

ЗЕМЛЯ И

космонавтика
астрономия
геофизика

№ 1 (343)

ЯНВАРЬ-ФЕВРАЛЬ, 2022

ISSN 0044-3948

ВСЕЛЕННАЯ

КОСМИЧЕСКИЕ ИЛИ НАЗЕМНЫЕ?

ПУЛКОВСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ – ВОКРУГ РЕФРАКТОРА

Я ВЕЧНО К ВАМ ИДУ... К 125-летию А.Л. ЧИЖЕВСКОГО

ПЛАЗМЕННАЯ СИМФОНИЯ В КОРОНЕ СОЛНЦА
ЗАЧЕМ СОЛНЦУ НАДО МАГНИТНОЕ ТОРНАДО?
СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР И ТОКОВЫЕ СЛОИ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ ЖУРНАЛЫ ТЕПЕРЬ ДОСТУПНЫ ВСЕМ



Уважаемые коллеги!
Открыта подписка для физических лиц
на номера 2022 г. научно-популярных журналов
«Земля и Вселенная», «Природа»,
«Энергия: экономика, техника, экология»

ЖУРНАЛ «ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ»

Стоимость годового комплекта (6 номеров) 1650 руб.

Редакция журнала

Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 42-31)

E-mail: zevs@naukaran.com

Шубинский пер., д. 6, стр. 1

ЖУРНАЛ «ПРИРОДА»

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3840 руб.

Редакция журнала

Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 41-71)

E-mail: priroda@naukaran.com

Шубинский пер., д. 6, стр. 1

ЖУРНАЛ «ЭНЕРГИЯ: ЭКОНОМИКА, ТЕХНИКА, ЭКОЛОГИЯ»

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3840 руб.

Редакция журнала

Тел.: +7 (495) 362-07-82

E-mail: energy@iht.mpei.ac.ru

ул. Красноказарменная, 17а

**Журналы также можно приобрести в розницу в сети
магазинов «Академкнига» по следующим ценам:**

«Земля и Вселенная» — 295 руб.

«Природа» — 340 руб.

«Энергия: экономика, техника, экология» — 340 руб.

**Выпуски и статьи журналов в электронном
виде можно приобрести на сайте libnauka.ru**



СТОИМОСТЬ ОДНОГО ВЫПУСКА/СТАТЬИ ЖУРНАЛА В ЭЛЕКТРОННОМ ВИДЕ, ИЗДАННОГО В 2022 ГОДУ

Журнал	Выпуск (руб.)	Статья (руб.)
«Земля и Вселенная»	229	79
«Природа»	286	79
«Энергия: экономика, техника, экология»	286	79

Подписаться можно в редакциях
указанных журналов.

Убедительная просьба связаться
с редакциями перед визитом.

**В случае возникновения вопросов можно также обращаться
в Управление по выпуску журналов ФГУП «Издательство «Наука»:**

Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 43-01)

E-mail: journals@naukaran.com

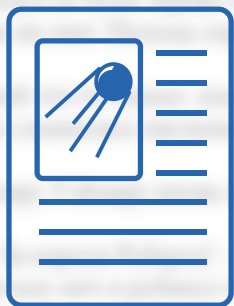


Издательство “Наука” оказывает услуги:

- СОЗДАНИЕ ОРИГИНАЛ-МАКЕТА
 - редактирование
 - вёрстка
 - изготовление рисунков
- ХУДОЖЕСТВЕННОЕ ОФОРМЛЕНИЕ
- ВСЁ КОМПЛЕКС ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ УСЛУГ
- РАСПРОСТРАНЕНИЕ В РОЗНИЧНОЙ СЕТИ “АКАДЕМКНИГА”

Высокопрофессиональные специалисты “Науки”
готовы к сотрудничеству

naukapublishers.ru



НАУКА

www.libnauka.ru

*Добро пожаловать
в электронную библиотечную систему
Издательства «Наука»!*

Электронная библиотечная система Издательства «Наука» – это простой и удобный доступ к огромной коллекции статей и книг, входящих в портфолио «Науки»

Электронная библиотечная система это:

- научная, научно-популярная и классическая литература, от статей до монографий
- оперативное обновление новинок благодаря тесной интеграции с редакционно-издательской системой «Науки»
- разветвленный тематический каталог
- простая и эффективная система поиска
- интуитивная и простая система оформления заказа и подписок
- прозрачная система статистики
- надежность доступа и стабильность работы

Реклама

Присоединяйтесь к миру «Науки»!

ЗЕМЛЯ И

№1 (343)

ЯНВАРЬ-ФЕВРАЛЬ, 2022

ISSN 0044-3948

космонавтика
астрономия
геофизика

ВСЕЛЕННАЯ

Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
«Наука»
Москва

На обложке:

В 2021 г. космический зонд
Parker Solar Probe (NASA)
сблизился с Солнцем на расстояние
18.8 солнечных радиусов
(около 13 миллионов км)
и, предположительно, пересек
условную границу, отделяющую
область солнечной короны
от области солнечного ветра
(показана сеткой). Изображение
© NASA's Goddard Space Flight
Center/Joy Ng

В НОМЕРЕ:

Колонка главного редактора	3
НАКАРЯКОВ В.М., ЗИМОВЕЦ И.В., АНФИНОГЕНТОВ С.А. Плазменная симфония, или Магнитогидродинамические волны в короне Солнца	5
ХАБАРОВА О.В. Зачем Солнцу надо магнитное торнадо?	22
КИСЛОВ Р.А. Солнечный ветер и токовые слои: классические представления и новые открытия	36
ТАРАСОВ Н.Т. Солнечная активность, космическая погода и землетрясения	52

Космонавтика XXI века

ШУСТОВ Б.М. Космические или наземные?	63
---------------------------------------	----

Обсерватории, институты

КИЯЕВА О.В., ИЗМАЙЛОВ И.С., СОБОЛЕВА Т.В., ШАХТ Н.А. Пулковская обсерватория – вокруг рефрактора	74
--	----

Люди науки

ГУРФИНКЕЛЬ Ю.И. Я вечно к вам иду... (К 125-летию А.Л. Чижевского)	89
Table of Content and Selected Abstracts	109

Earth&Universe: Astronomy, Geophysics, Cosmonautics
Bimonthly popular scientific magazine of the Russian Academy of Sciences & NAUKA Publishing.
Founded 1965.

Published by NAUKA Publishing, Profsoyuznaya Str., 90, 117997, Moscow, Russia.

Редакционная коллегия:

главный редактор
академик Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ,
летчик-космонавт
П.В. ВИНОГРАДОВ,
зам. главного редактора
кандидат филолог. наук
О.В. ЗАКУТНЯЯ,
доктор исторических наук
К.В. ИВАНОВ,
летчик-космонавт
А.Ю. КАЛЕРИ,
кандидат физ.-мат. наук
О.Ю. ЛАВРОВА,
доктор физ.-мат. наук
А.А. ЛУТОВИНОВ,
зам. главного редактора
доктор физ.-мат. наук
О.Ю. МАЛКОВ,
доктор физ.-мат. наук
И.Г. МИТРОФАНОВ,
академик И.И. МОХОВ,
член-корр. РАН
И.Д. НОВИКОВ,
доктор физ.-мат. наук
С.П. ПЕРОВ,
доктор физ.-мат. наук
К.А. ПОСТНОВ,
доктор физ.-мат. наук
М.В. РОДКИН,
научный директор
Московского планетария
Ф.Б. РУБЛЁВА,
член-корр. РАН
А.Л. СОБИСЕВИЧ,
член-корр. РАН
О.Н. СОЛОМИНА,
член-корр. РАН
В.А. СОЛОВЬЁВ,
академик
А.М. ЧЕРЕПАЩУК,
доктор физ.-мат. наук
В.В. ШЕВЧЕНКО,
член-корр. РАН
Б.М. ШУСТОВ

Editorial Board:

Editor-in-chief
Acad. Dr. Lev M. ZELENYI
Acad. Dr. Anatoly M. CHEREPASCHUK
Dr. Konstantin V. IVANOV
Pilot-cosmonaut Alexander Yu. KALERI
Dr. Olga Yu. LAVROVA
Dr. Alexander A. LUTOVINOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Oleg Yu. MALKOV
Dr. Igor G. MITROFANOV
Acad. Dr. Igor I. MOKHOV
RAS Corr.Member Dr. Igor D. NOVIKOV
Dr. Stanislav P. PEROV
Dr. Konstantin A. POSTNOV
Dr. Mikhail V. RODKIN
Faina B. RUBLEVA
Dr. Vladislav V. SHEVCHENKO
RAS Corr. Member Dr. Boris M. SHUSTOV
RAS Corr. Member Dr. Alexey L. SOBISEVICH
RAS Corr. Member Dr. Olga N. SOLOMINA
RAS Corr. Member Dr. Vladimir A. SOLOVYEV
Pilot-cosmonaut Pavel V. VINOGRADOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Olga V. ZAKUTNYAYA

Колонка главного редактора

Дорогие читатели, коллеги, друзья! Поздравляю с наступившим Новым годом!

Ничего, что первый номер «ЗиВ» доберется до вас только в феврале – год предстоит длинный и наполненный событиями. Так уж сложилось, что сразу два запуска наших космических экспедиций: к Луне («Луна-25») и к Марсу («ЭкзоМарс-2022») – сос-

тоятся летом и осенью 2022 года. Не так страшен сам перенос (ждали несколько десятилетий – подождем еще год), а то, что разнообразные мероприятия, предшествующие запуску, могут начать перекрываться по времени, тем более что «Луна-25» улетит с нового российского космодрома «Восточный», а «ЭкзоМарс» – с Байконура. Что же, постучим по дереву и будем ждать успеха. Как никогда нам нужны две победы, а за ценой мы уже давно не стоим.

Предновогодние дни тоже оказались волнительны. В космос наконец-то был выведен – из-за нескольких задержек по причине плохой погоды – уже легендарный (в том числе из-за больших переносов запуска) американско-европейско-канадский телескоп «Джеймс Вебб».

Когда я пишу эти строки, пришла отличная новость о том, что успешно развернуто масштабное позолоченное зеркало обсерватории, приведен в готовность солнечно-защитный экран и космический аппарат направляется к гало-орбите вокруг точки Лагранжа L_2 , расположенной в 1.5 миллиона километров от Земли.

Именно там уже третий год работает российская рентгеновская обсерватория «Спектр-РГ», статьи о результатах которой должны выйти в ближайших номерах «ЗиВ».



В этом же номере центральной темой выпуска снова стало Солнце. Это неудивительно – наше светило составляет основную часть Солнечной системы (по массе), кроме этого, в последние годы мы узнаем все больше подробностей о его жизни, в том числе благодаря космическим инструментам. Приятно, что в этом номере к уже маститым «солнечникам» присоединяются и молодые авторы. Поздравляем Романа Кислова, недавно ставшего кандидатом физико-математических наук, с первой научно-популярной публикацией.

В феврале 2022 года исполняется 125 лет со дня рождения замечательного ученого и визионера, основателя нового научного направления – гелиобиологии Александра Чижевского. Гелиобиология как наука, несмотря на ожесточенные споры вокруг ее предсказаний, постепенно все четче выявляет физические механизмы воздействия солнечных излучений на живые организмы.

В музее А.Л. Чижевского в Калуге 14–18 февраля планируется юбилейная конференция, посвященная его памяти, где будут много говорить об этих темах. В этом же номере публикуется статья известного врача и специалиста по гелиобиологии Ю.И. Гурфинкеля о том, как сплелись в его жизни два имени: Александра Леонидовича

Чижевского и Анастасии Ивановны Цветаевой.

Пользуясь случаем, хочу поздравить давнего и верного автора нашего журнала, члена редколлегии, члена-корреспондента РАН Б.М. Шустова с семидесятипятилетием. Несмотря на уже серьезный возраст, Борис Михайлович находится на пике научной активности. В этом номере публикуется его статья о наземных и космических телескопах, а сам он плотно занят подготовкой к большой международной конференции «Околоземная астрономия – 2022» (18–21 апреля 2022 г.). Она будет посвящена двум все более остро стоящим проблемам: космическому мусору и астероидно-кометной опасности.

Борис Михайлович давно «бьет в набат», стараясь привлечь внимание руководства к этим нелегким вопросам, – и пожалуй, уже можно сказать, что виден результат его многолетних усилий. Недавно на заседании ГК «Роскосмос» утверждена концепция создания системы для обеспечения безопасности

космической деятельности «Млечный путь». Научные проблемы, возникающие при создании этой системы, будут обсуждаться на конференции. И впоследствии мы познакомим читателей журнала с основными результатами этих обсуждений.

Еще раз желаем нашим читателям удач и здоровья в наступившем году, а мы, по мере сил, будем держать Вас в курсе новейших открытий и о Земле, и о всей большой Вселенной.

*Главный редактор журнала
«Земля и Вселенная» академик
Лев Матвеевич Зелёный*

От редакции: в декабре 2021 года академик Лев Зелёный, научный руководитель ИКИ РАН, стал лауреатом золотой медали имени В.Л. Гинзбурга Российской академии наук, которая присуждается за выдающиеся работы в области физики и астрофизики. Награды удостоен цикл работ «Токовые слои и пересоединение магнитных полей в космической плазме». Поздравляем!



Реклама

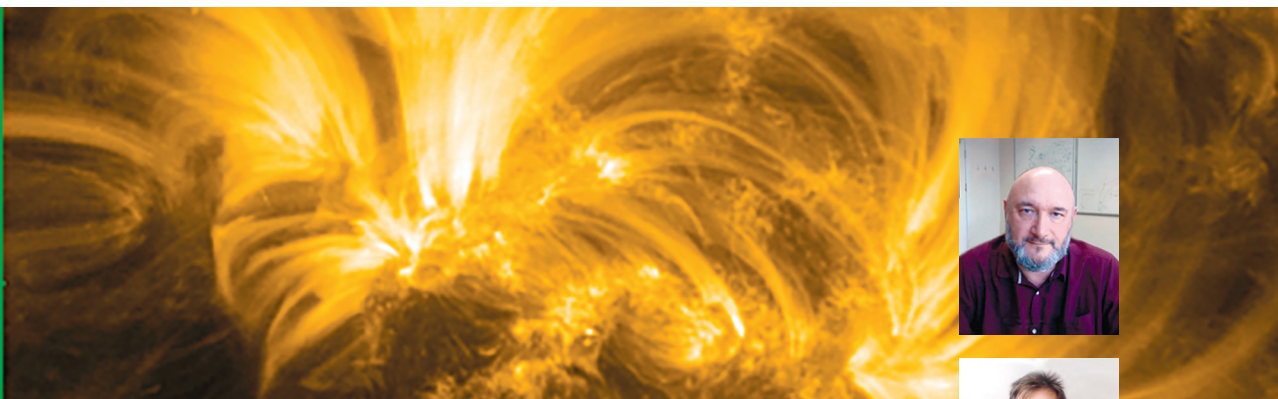
Издательство предлагает услуги по редакционно-издательской подготовке материалов, сборников, а также весь комплекс полиграфических услуг

Издательство «Наука» готово оказать услуги под ключ по организации и проведению семинаров, конференций, презентаций, выставок в конференц-залах и на экспозиционных площадках издательства по адресам:

г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Московская обл., г. Люберцы, Октябрьский пр-т, д. 403

По всем интересующим вопросам обращайтесь по тел.: +7(495)276-7735
Подробная информация на сайте www.naukapublishers.ru/history/partnership

ПЛАЗМЕННАЯ СИМФОНИЯ, ИЛИ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В КОРОНЕ СОЛНЦА



НАКАРЯКОВ Валерий Михайлович,

кандидат физико-математических наук,
профессор физики, Уорвикский университет, Великобритания,
Специальная астрофизическая обсерватория РАН

ЗИМОВЕЦ Иван Викторович,

кандидат физико-математических наук
Институт космических исследований РАН

АНФИНОГЕНТОВ Сергей Александрович,

кандидат физико-математических наук
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН

DOI: 10.7868/S00044394822010017

Корона Солнца продолжает оставаться одной из наиболее загадочных областей Солнечной системы. Основной интерес к этой части атмосферы Солнца обусловлен двумя факторами. Во-первых, именно здесь происходят самые энергетически мощные явления в Солнечной системе, в том числе солнечные вспышки и выбросы массы. Во-вторых, солнечная корона – это естественная лаборатория для изучения многообразных процессов в плазменной среде. Прецизионные инструменты, с помощью которых регистрируют солнечное радиоизлучение и невидимое с поверхности Земли ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, позволяют наблюдать в короне разнообразные волновые процессы. Эти процессы представляют собой стоячие или бегущие возмущения плазмы и магнитного поля, которое пронизывает корону. Длины наблюдаемых волн обычно превышают тысячу километров, а периоды их колебаний – одну секунду. Наблюдаемые волны относятся к нескольким разным типам, которые предсказывает теория магнитной гидродинамики (МГД). Совокупность этих волн можно представить как своеобразную «музыку», исполняемую солнечной короной. Прослушивание и анализ этой «музыки» позволяет получать крайне важную и зачастую уникальную информацию о физических свойствах плазмы солнечной короны и о протекающих в ней процессах.

Изображение на заставке получено обсерваторией SDO, NASA

ЧТО ТАКОЕ КОРОНА СОЛНЦА?

Несмотря на несколько десятилетий активных исследований, верхняя часть атмосферы ближайшей и самой важной для нас звезды, ее *корона*, продолжает оставаться одной из наиболее загадочных областей Солнечной системы. Нижней границей короны Солнца считается область крайне резкого роста локальной температуры атмосферы с высотой. Скачок температуры с десятков тысяч градусов в хромосфере до миллионов в короне происходит в узкой области толщиной в десятки километров, называемой переходной зоной. Одновременно с ростом температуры с высотой относительно плавно уменьшается плотность вещества. Отличие короны Солнца от лежащей под ней хромосферы заключается в том, что в короне доминируют магнитные силы и в ней происходит полная ионизация водорода и гелия – основных химических элементов, которые входят в состав атмосферы Солнца. Таким образом, корона – это газ из независимо движущихся протонов с небольшой примесью альфа-частиц (ядер гелия) и ионов более тяжелых элементов. Кроме того, в короне содержатся электроны, которые взаимодействуют друг с другом не только за счет соударений, как в обычном газе, но и за счет создаваемых заряженными частицами электромагнитных полей. Такая среда называется плазмой, которая часто рассматривается в качестве четвертого фазового состояния вещества, с физическими свойствами, отличающимися от «обычных» фазовых состояний: твердого, жидкого и газообразного.

ЗАЧЕМ ИЗУЧАЮТ СОЛНЕЧНУЮ КОРОНУ?

Более 99.99% вещества, наблюдаемого во Вселенной, находится в плазменном состоянии. Создание и особенно удерживание

плазмы в лабораторных условиях является весьма нетривиальной технической задачей. В то же время, в любой момент времени в короне Солнца может наблюдаться высокоионизированная плазма с широким диапазоном температур (от 50 тыс. до 30 миллионов К) и концентраций (от 10^6 до 10^{11} частиц в кубическом сантиметре¹). Таким образом, корона Солнца – уникальная естественная лаборатория для изучения физики плазмы. В частности, в короне возможно наблюдение плазменных процессов, аналогичных протекающим в реакторах управляемого термоядерного синтеза.

Помимо академического интереса, исследование короны позволяет понять и спрогнозировать разнообразные процессы и явления на Солнце, включая вспышки и корональные выбросы массы (КВМ), которые являются самыми мощными процессами энерговыделения в Солнечной системе. Например, во время КВМ более миллиарда тонн плазмы может устремиться к Земле со скоростью, достигающей 3 тыс. км/с или одного процента от скорости света. Во время вспышки Земля может быть облучена всплесками интенсивного ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения, а также ускоренными до релятивистских энергий частицами. Полная энергия, выделяемая в мощной вспышке, достигает 10^{32} эрг или около 3×10^{18} кВт·час, а полная энергия КВМ может быть еще на порядок выше. Эти значения в миллионы раз превышают энергию взрыва атомной бомбы. При этом общепризнано, что источником выделяемой энергии является магнитное поле. Очевидно, что вспышки и КВМ могут напрямую влиять на разнообразные технические процессы как в околоземном пространстве, например, на

¹ Плотность плазмы короны ниже 10^{-12} кг/м³. Для сравнения, плотность атмосферы Земли на уровне моря составляет около 1.2 кг/м³.

спутниках, так и на Земле, вызывая нарушения связи, навигации, увеличения дозы радиации, получаемой экипажами и пассажирами самолетов, и вызывая электрические пробой в системах энергетической инфраструктуры. Подобные явления, называемые экстремальными явлениями космической погоды, зарождаются в короне Солнца, и их исследование составляет безусловный практический интерес.

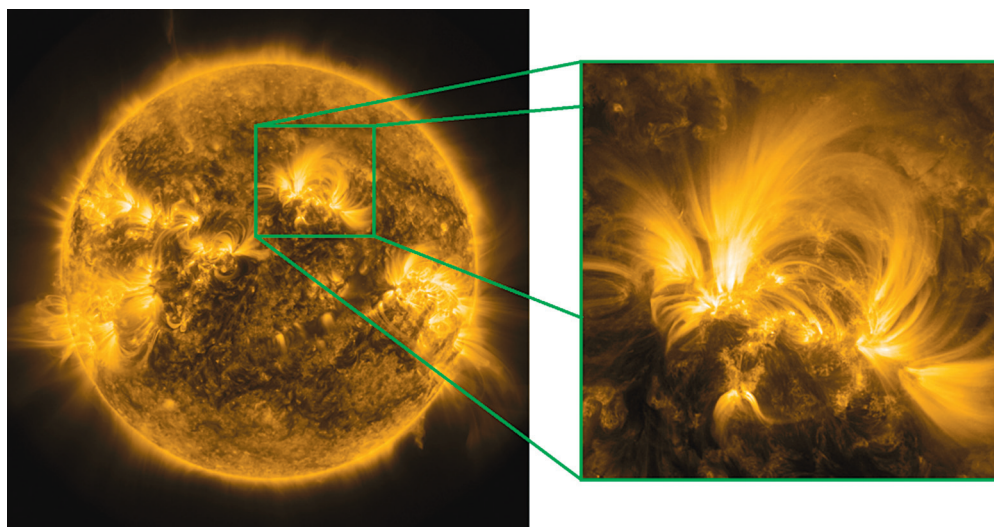
КАК ИЗУЧАЮТ СОЛНЕЧНУЮ КОРОНУ?

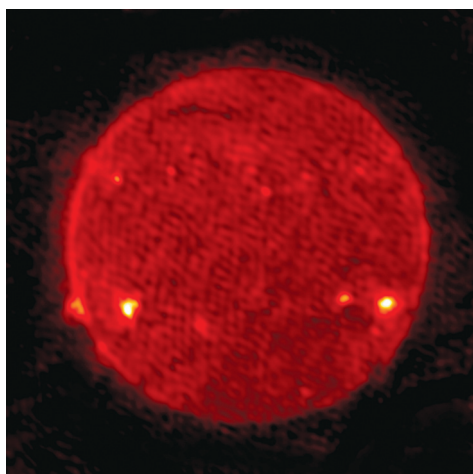
При несомненной важности исследования короны Солнца, ее наблюдение – задача непростая. Поскольку температура коронального вещества достигает в среднем около миллиона градусов, то основное излучение приходится на крайний ультрафиолетовый (КУФ) и рентгеновский диапазоны, которые эффективно экранируются земной

атмосферой. Таким образом, наземные наблюдения короны ограничены диапазоном видимого света, в котором полная яркость короны более чем в миллион раз ниже яркости поверхности Солнца, а также радиодиапазоном. Основную же информацию получают космические изображающие телескопы и спектрометры КУФ и рентгеновского диапазонов. Разрешающая способность космических инструментов, иными словами, способность различать мелкошабные объекты, ограничена техническими и финансовыми аспектами. Например, размер пикселя КУФ-изображений, получаемых на инструменте *SDO/AIA* (*Atmospheric Imaging Assembly* на космическом аппарате *Solar Dynamics Observatory*), составляет 0.6 угловой секунды, что соответствует размеру около 400 км на солнечном диске.

Подобные изображения получают данным инструментом каждые 12 секунд. Близкими параметрами обладал и КУФ-телескоп *ТЕСИС* на россий-

Слева: изображение короны Солнца на длине волны около $171 \text{ \AA}$ (длина волны излучения иона железа Fe IX при температуре около 1 млн К), полученное на инструменте *SDO/AIA*. Справа: увеличенный фрагмент, соответствующий отдельной активной области. На фрагменте хорошо видны неоднородности плазмы, которые очерчивают структуру магнитного поля. Такие неоднородности называются корональными петлями





ском космическом аппарате «Корона-Фотон», который работал в 2009 году. Существенно более высокое временное разрешение достигается на наземных радиотелескопах и радиоинтерферометрах, но, к сожалению, ценой ухудшения пространственного разрешения. Например, *Сибирский Радиогелиограф* (СРГ) обеспечивает пространственное разрешение около 10–30 угловых секунд, но

Вверху: Строящийся российский Сибирский Радиогелиограф (СРГ); слева: полученное СРГ радиоизображение Солнца на частоте 3.5 ГГц (фото СРГ сделано Станиславом Толстневим и публикуется с разрешения автора)

позволяет получать изображения Солнца с заметно более короткими временными интервалами между последовательными снимками, чем *SDO/AIA*.

Для регистрации одного изображения СРГ требуется всего 200 мс. Таким образом, если наблюдения ведутся на 6 частотах, то на каждой частоте изображения записываются немногим реже одного раза в секунду. Это в десять раз быстрее, чем на *SDO/AIA*. Разумеется, длины радиоволн, используемых для наблюдений Солнца, должны быть существенно короче ионосферных отсечек (несколько десятков МГц), чтобы исключить влияние земной ионосферы.

Особую трудность представляет измерение магнитного поля в короне –

из-за ее огромной температуры и относительно невысоких величин напряженности поля, от нескольких Гаусс в корональных дырах до нескольких сотен Гаусс над солнечными пятнами. Кроме того, геометрия магнитного поля в короне является довольно сложной и существенно отличается от дипольной геометрии магнитного поля Земли.

С солнечной короной связано несколько любопытных загадок. До сих пор неразрешенным остается вопрос высокой температуры плазмы в короне, известный в литературе как «проблема нагрева солнечной короны». Второй закон термодинамики не позволяет объяснить ее нагрев переносом тепла с существенно более холодной, всего около 6 тыс. градусов, поверхности Солнца: холодное тело не может нагреть горячее. Следовательно, источник нагрева должен находиться в самой короне, и им является магнитное поле. Однако детали эффективной трансформации энергии магнитного поля в тепло остаются непонятными. Столь же непонятным остается механизм, приводящий к истечению плазмы Солнца в Солнечную систему – солнечного ветра – со скоростью до 1 тыс. км/с. Это так называемая «проблема ускорения солнечного ветра». Процессы, приводящие к крайне мощным выделениям энергии в виде вспышек и КВМ, являются не менее интригующими.

БЕСПОКОЙНАЯ ПЛАЗМА, ИЛИ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОРОНЕ

Характерная особенность солнечной короны – это ее неоднородность и динамичность. Прежде всего, корона делится на «открытую» и «закрытую», что определяется локальной геометрией магнитного поля. В закрытой короне

магнитные силовые линии, выходящие из-под видимой глазом поверхности Солнца (фотосферы), поднимаются вверх в корону, а затем возвращаются назад, тогда как в открытой короне они выходят в Солнечную систему. Разумеется, магнитные силовые линии всегда замкнуты. Но в открытой короне, на масштабах в несколько радиусов Солнца, они уходят на «бесконечность», до внешних границ Солнечной системы и дальше.

На фотосфере сильные магнитные поля сконцентрированы в солнечных пятнах, которые видны в оптический телескоп как темные образования. Именно сильное магнитное поле затрудняет перемешивание плазмы в пятнах и делает их более холодными, а значит, более темными по сравнению с окружающими участками.

В короне над пятнами или более слабыми источниками магнитного поля находятся области закрытой короны, содержащие горячую и плотную плазму. Именно там происходит большая часть вспышек и КВМ, поэтому такие области называются «активными». Плазма закрытой короны формирует неоднородности, вытянутые вдоль магнитного поля. На КУФ-изображениях, как было показано выше, эти структуры видны как яркие дуги или петли, откуда они и получили свое название «корональные петли». Как правило, плотность плазмы в петлях в несколько раз выше, чем вокруг них. Время жизни петель обычно составляет несколько часов, а более крупные образования, такие как корональные дыры и активные области, могут существовать до нескольких недель, что превышает один оборот Солнца вокруг своей оси (около 28 дней).

Нижние слои солнечной атмосферы находятся в постоянном движении из-за процессов конвекции, которая делает видимую поверхность Солнца

похожей на кипящий суп. Всплытие горячего вещества из глубин Солнца формирует конвективные ячейки разных масштабов. Самые маленькие называются «гранулы», а более крупные – «супергранулы». Характерный размер гранул составляет несколько тысяч километров, а время жизни – всего несколько минут. Скорости конвективных течений на поверхности Солнца могут достигать нескольких км/с. Эти движения переносятся и в корону, где они перепутывают и скручивают силовые линии магнитного поля и тем самым подводят энергию в корональную плазму. В самой короне наблюдается целый ряд динамических процессов, проявляющихся в виде разнообразных течений, струй и эрупций (выбросов плазмы), а также быстрого охлаждения или нагрева отдельных плазменных структур. В частности, поскольку плазма короны – сжимаемая и эластичная среда, то любое возмущение, локализованное во времени и пространстве, например, вспышка, порождает разнообразные движения плазмы. Помимо этого, различные плазменные структуры оказываются неустойчивыми, что может приводить к их быстрой реконфигурации, например слиянию друг с другом или разделению.

Особым классом динамических процессов в короне являются волны, представляющие собой скоординированные течения плазмы, возмущающие величину и направление магнитного поля, газовое давление, а также плотность и температуру плазмы. Характерные периоды волновых движений, наблюдаемых в короне, составляют от долей секунды до десятков минут, а характерные длины волн – от нескольких сотен километров до нескольких сотен тысяч километров. Наблюдаемые скорости распространения волновых движений составляют от нескольких десятков до нескольких тысяч км/с. Для сравне-

ния, скорости звука в горячей плазме короны, определяемые по температуре, есть величины от нескольких десятков до нескольких сотен км/с. Разумеется, данные измерения ограничены разрешением наблюдательных инструментов. В большинстве случаев наблюдаемые в короне волны локализованы в конкретных плазменных неоднородностях, таких как индивидуальные петли или пучки петель.

СОЮЗ ПЛАЗМЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ: МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Параметры наблюдаемых в солнечной короне волновых процессов указывают на их магнитогидродинамическую природу. Магнитная гидродинамика (МГД) – это один из методов математического описания процессов, протекающих в электропроводящей жидкости или газе, например, в жидком металле. МГД применяется также для моделирования крупномасштабных процессов в плазме атмосферы Солнца. МГД описывает самосогласованные течения вещества и эволюцию электромагнитных полей, как вызванных данными течениями, так и вызывающих их. Сложность подобного описания заключается в необходимости одновременного учета ускорения плазмы силой Лоренца, возникающей при движении электрических зарядов в магнитном поле, и генерации этого магнитного поля электрическим током, являющимся движением этих зарядов. Впервые система уравнений МГД, связывающая гидродинамику и электромагнетизм, была выведена шведским физиком Ханнесом Альфвеном (Alfvén), получившим за создание МГД в 1970 г. Нобелевскую премию и в 1971 г. золотую медаль имени Ломоносова АН СССР.

В приложении к короне крайне важным МГД-эффектом является так называемая «вмороженность» магнитного поля в плазму. Другими словами, движения плазмы сопровождаются деформацией геометрии пронизывающего ее магнитного поля и, в свою очередь, изменение геометрии магнитного поля вызывает смещения плазмы. Эффект «вмороженности» основан на том, что плазма является идеально проводящей средой. Разумеется, электрическое сопротивление становится равным нулю только при сверхпроводимости, но в плазме солнечной короны величина сопротивления настолько мала, что данное условие выполняется достаточно хорошо. При почти нулевом сопротивлении индуцируемое движением плазмы электрическое поле должно быть равно нулю, а иначе, в соответствии с законом Ома, в плазме возник бы бесконечный электрический ток, что невозможно. В рамках МГД-приближения, на элементарный объем плазмы действует несколько сил. Во-первых, хорошо известная сила, связанная с газовым давлением, которая толкает плазму из областей с высоким давлением в области с низким давлением. Во-вторых, могут действовать две силы магнитной природы. Первая из них – это направленная перпендикулярно полю сила магнитного натяжения, которая стремится выпрямить изогнутые магнитные силовые линии. Ее величина определяется напряженностью магнитного поля и радиусом кривизны изогнутых силовых линий. Вторая – это сила магнитного давления. Так же как газ стремится вытекать из областей высокого давления, магнитное поле стремится «расшириться» из областей повышенной напряженности магнитного поля. В силу эффекта «вмороженности», обе магнитные силы вызывают ускорение плазмы, которое согласно второму

закону Ньютона обратно пропорционально плотности плазмы.

Конкуренция трех указанных сил, связанных с газовым и магнитным давлениями, а также магнитным натяжением, приводит к появлению различных типов МГД-волн. Например, вдоль поля могут распространяться продольные волны, напоминающие обычные звуковые. Поскольку смещения плазмы в них параллельны полю, то сила Лоренца обращается в ноль, и волны «не чувствуют» поля. Смещения плазмы поперек поля приводят к появлению силы магнитного натяжения, которая стремится восстановить первоначальную геометрию поля. В силу эффекта «вмороженности» возвращение поля в первоначальное состояние сопровождается ускоренным движением плазмы в направлении поперек поля. Другими словами, потенциальная энергия возмущенного начальным смещением поля переходит в кинетическую энергию плазмы, которая проскакивает состояние равновесия и деформирует поле в сторону, противоположную начальному возмущению. Это движение сопровождается появлением силы магнитного натяжения, которая тормозит движение плазмы, останавливает его и затем ускоряет в направлении равновесия. Периодическое повторение данного процесса вызывает поперечное колебание плазмы и магнитного поля около положения равновесия с периодическим переходом потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Данная картина напоминает колебания струны. Колебательное поперечное движение «магнитной струны» распространяется вдоль поля в виде волны, называемой альфвеновской, в честь Ханнеса Альфвена. Альфвеновская волна распространяется строго вдоль магнитного поля. Ее скорость, определяемая отношением напряженности поля и корня из плотности плазмы,

называется альфвеновской скоростью. Альфвеновская волна не возмущает плотность плазмы и газовое и магнитное давления. В условиях солнечной короны альфвеновские волны не возмущают интенсивности теплового излучения, в частности в КУФ-диапазоне.

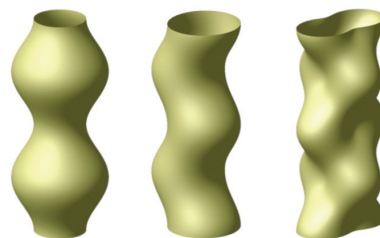
Важно отметить, что необходимо различать волны продольные и поперечные, которые характеризуются смещениями плазмы соответственно вдоль или поперек направления распространения волны, и волны параллельные, перпендикулярные и наклонные, которые распространяются вдоль или поперек приложенного извне магнитного поля или под углом к нему. По данной терминологии альфвеновские волны являются поперечными и либо параллельными, либо наклонными. Последнее обстоятельство может привести к некоторой путанице, поскольку энергия и информация переносится альфвеновскими волнами строго вдоль поля, тогда как наблюдаемое движение волновых фронтов может быть направлено к полю под углом.

МГД-волны, возмущающие плотность плазмы, называются магнитозвуковыми, причем различают быстрые и медленные магнитозвуковые волны. В случае наклонного по отношению к магнитному полю распространения волн, их свойства определяются конкуренцией газового и магнитного давлений. Волны, в которых возмущения давлений в одной фазе, и следовательно, газовая и магнитная силы направлены в одном направлении, называются в условиях короны быстрыми магнитозвуковыми (БМЗ). В медленных магнитозвуковых (ММЗ) волнах эти возмущения в противофазе, а газовая и магнитные силы противодействуют друг другу. В условиях короны скорость БМЗ-волн определяется, в основном, альфвеновской скоростью, а ММЗ-волн – звуковой скоростью.

В случае распространения вдоль поля, БМЗ-волна становится альфвеновской, а ММЗ-волна – звуковой. Скорости распространения МГД-волн всех типов определяются скоростью звука и альфвеновской скоростью, а также углом между направлением их распространения и полем. БМЗ-волны могут распространяться под любым ненулевым углом по отношению к направлению поля, в том числе и перпендикулярно ему. Угол распространения ММЗ-волн по отношению к полю не может превышать определенное значение. Почти во всех областях короны альфвеновская скорость в несколько раз выше звуковой скорости. Это означает, что БМЗ- и ММЗ-волны хорошо разделены по их скоростям: скорости ММЗ-волн составляют от нескольких десятков до нескольких сотен км/с, тогда как скорости БМЗ-волн – от нескольких сотен до нескольких тысяч км/с. Данное обстоятельство является чрезвычайно важным для интерпретации наблюдаемых волновых явлений.

Присущая солнечной короне неоднородность плазмы приводит к неоднородности локальных альфвеновской и звуковой скоростей, что может вызвать рефракцию и даже отражение магнитозвуковых волн. Плазменные петли приобретают свойства волновода, поскольку волны в этом случае распространяются вдоль оси петли. Направляемая волноводом волна локально распространяется под углом к его оси, а глобально – вдоль оси волновода. (Аналогичный эффект используется в ряде инженерных приложений, например в оптических волокнах.) Возникает также дисперсия волн, которая зависит от диаметра волновода и обусловлена зависимостью скорости волны от ее длины. Для МГД-волн в корональных петлях дисперсия была впервые описана в работах В.В. Зайцева и А.В. Степанова. В отличие от

Структура возмущения границы плазменного цилиндра МГД-волнами различных типов: сосисочной (слева), линейно поляризованной изгибной (в центре) и гофрировочной (справа)



ММЗ-волн, свойства БМЗ-волн сильнее зависят от отношения длины волны к диаметру волновода. Различают волны изгибные, характеризующиеся смещением оси волновода и почти не возмущающие его локальный диаметр, сосисочные или волны типа перетяжек, а также баллонные или гофрировочные.

В разнообразных плазменных неоднородностях солнечной короны современные инструменты позволяют наблюдать изгибные и сосисочные МГД-волны. Интерес к их изучению связан с их возможным вкладом в процессы нагрева короны, ускорения солнечного ветра и инициацией вспышек. Кроме того, с помощью этих волн можно определять параметры плазмы, что составляет метод так называемой МГД-сейсмологии.

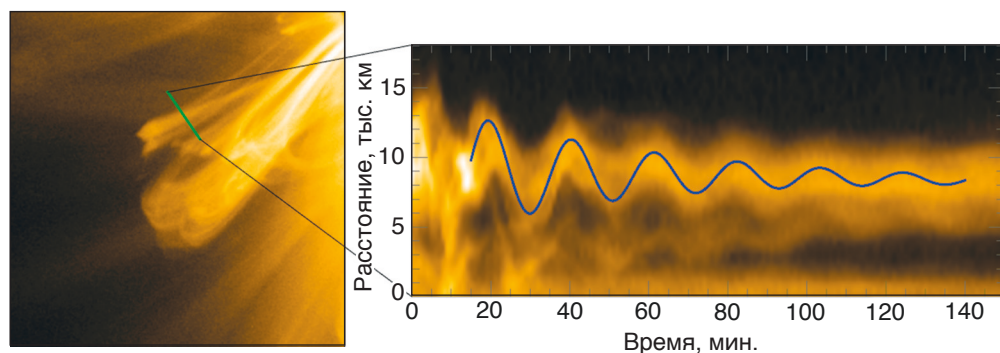
МАГНИТНАЯ ГИТАРА: ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ

Наиболее интенсивно изучаемый тип МГД-волн – это изгибные колебания корональных петель, фотосферные основания которых остаются неподвижными, а сами петли испытывают поперечные смещения, напоминающие колебания каната. Различные сегменты петли смещаются либо в фазе, либо в противофазе друг с другом, что указывает на то, что данные волны – стоячие. Изгибные волны являются поперечными, поскольку смещения плазмы в них в основном перпендикулярны направлению распространения волны.

Как любые другие поперечные волны, изгибные волны могут иметь линейную, эллиптическую или круговую поляризацию. В короне практически во всех наблюдаемых случаях изгибные волны поляризованы линейно.

Характерные периоды изгибных колебаний петель составляют несколько минут, а амплитуды поперечных смещений – несколько тысяч километров, что существенно превосходит разрешающую способность космических КУФ-телескопов. Стандартным методом поиска и анализа изгибных колебаний является построение пространственно-временных карт смещений петель. На КУФ-изображении выбирается линейный отрезок, перпендикулярный петле, и толщиной в один или несколько пикселей. Распределения интенсивности КУФ-излучения вдоль этого отрезка на данном и последующих снимках колеблющейся петли составляются в карту, в которой одна из координат – это расстояние вдоль отрезка, а другая – время снимка. Периодические смещения петли выявляются на данной карте как синусоидальные или зигзагообразные кривые.

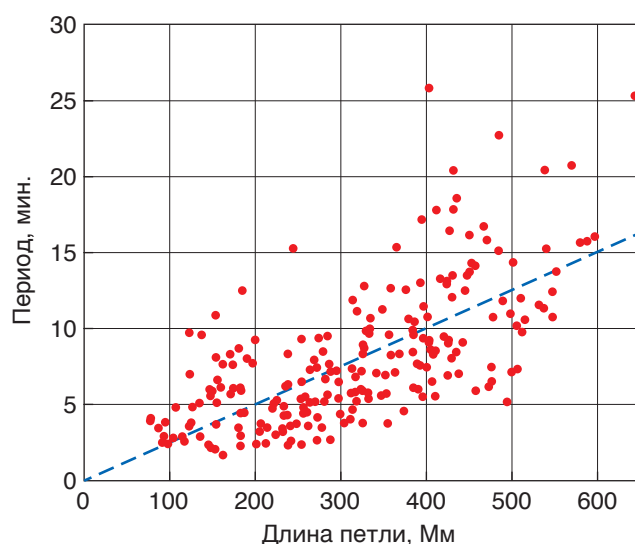
Анализ кривых позволяет определить период, амплитуду и фазу наблюдаемого колебания в выбранном сегменте петли. Длина волны определяется длиной колеблющейся петли. Очевидно, что длина волны существенно превосходит диаметр трубки петли. Наблюдаемые периоды лежат в интервале от одной до тридцати минут. Длины колеблющихся петель составляют от 70 до 600 тыс. км. Амплитуды изгибных



Пример пространственно-временной карты (справа), показывающей затухающие изгибные колебания корональной петли. Карта построена вдоль отрезка, ориентированного поперек яркой петли, показанного зеленым цветом на левой панели

колебаний достигают десяти тысяч километров и ограничены снизу разрешающей способностью телескопа. Необходимо отметить, что для линейно или эллиптически поляризованных изгибных колебаний определяемая таким образом амплитуда всегда ниже фактической. Это происходит потому, что плоскость колебания чаще всего не строго перпендикулярна лучу зрения.

Интересное свойство изгибных колебаний – это линейная зависимость их периода от длины колеблющейся петли.



Аналогичная зависимость хорошо известна гитаристам: зажимая струну на разных ладах, гитарист меняет ноту или период ее колебаний. Данная зависимость позволяет определять изгибную скорость как отношение длины волны к периоду колебаний. В свою очередь, по изгибной скорости рассчитывается альфвеновская скорость, что при возможности получить информацию о плотности плазмы дает оценку величины магнитного поля в колеблющейся петле. Подобный анализ, проведенный в нескольких петлях, составляющих активную область,

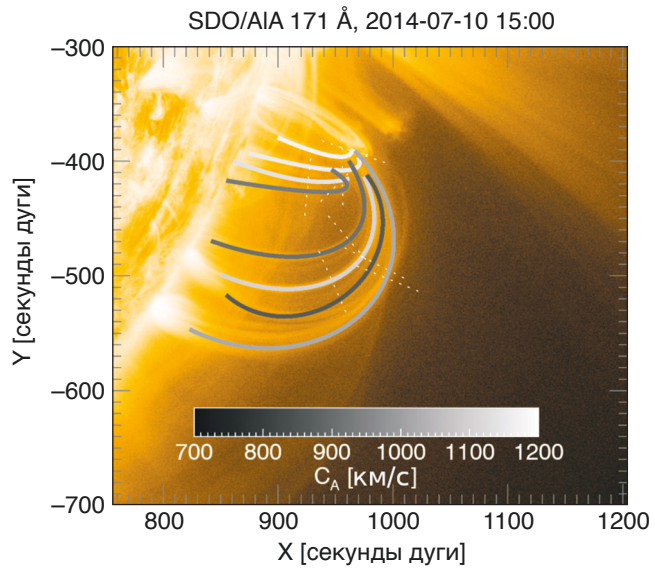
дает информацию о том, какова в ней структура магнитного поля. Диагностика параметров по МГД-волнам называется МГД-сейсмологией короны, по аналогии с диагностикой недр Земли сейсмическими волнами. В физике Солнца похожий подход – гелиосейсмо-

Зависимость периодов изгибных колебаний плазменных петель короны Солнца от длины петель. Длина выражена в мегаметрах (млн метров, Мм)

логия – используется для диагностики подфотосферных слоев Солнца по акустико-гравитационным волнам. Отличиями сейсмологии короны является тот факт, что она основана на МГД-волнах, а также обладает локализованностью (привязанностью к конкретной плазменной неоднородности).

В большинстве случаев изгибные колебания с амплитудами, превышающими диаметр петли, возбуждаются различными эруптивными течениями, смещающими петли из состояния равновесия. После возбуждения колебания затухают в течение нескольких периодов колебаний. Такое быстрое затухание на порядки превосходит затухание, связанное с вязкостью и электрическим сопротивлением.

Считается, что амплитуда изгибных колебаний убывает из-за перетекания их энергии в крутильные колебания альфвеновского типа, локализованные на концентрических поверхностях, на которых локальная альфвеновская ско-

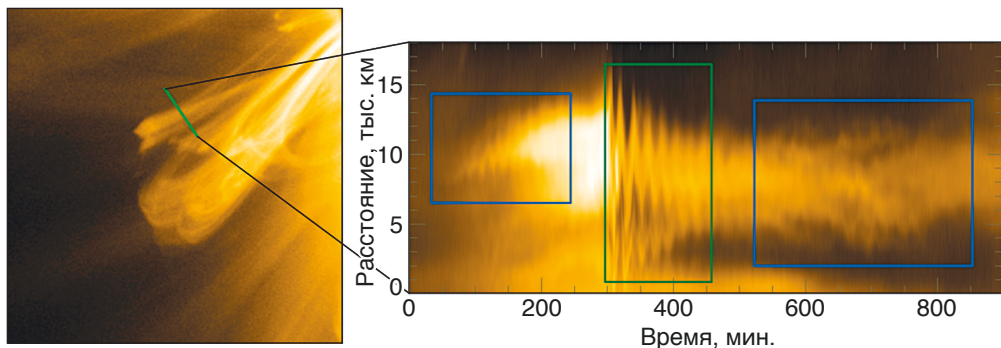


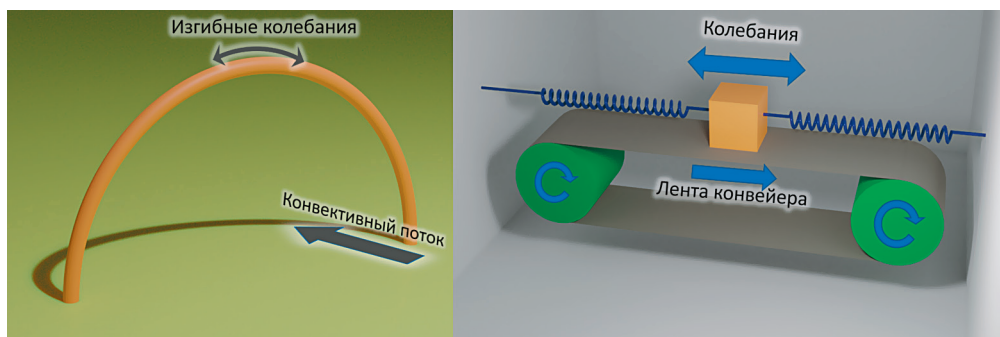
Пример определения карты альфвеновских скоростей в активной области солнечной короны. Карта определяется по изгибным колебаниям плазменных петель

рость совпадает с изгибной скоростью (так называемое резонансное поглощение). Возбуждение крутильных колебаний петель до сих пор не удалось подтвердить наблюдениями, и поэтому затухание изгибных колебаний остается предметом интенсивных исследований.

Если изгибные колебания больших амплитуд уверенно ассоциируются

Пример пространственно-временной карты для петли, показанной на рисунке на стр. 14, для более длинного интервала времени. Зеленой рамкой показан интервал существования затухающих изгибных колебаний, а синими – интервалы для незатухающих изгибных колебаний





Автоколебания корональной петли, возникающие из-за взаимодействия фотосферного конвективного потока с ее основанием (слева). Колебания петли в этом случае напоминают колебания струны скрипки под действием смычка. Справа показан пример автоколебаний пружинного маятника, груз которого лежит на монотонно движущейся ленте конвейера и совершает автоколебательные движения за счет периодического проскальзывания по ленте

с событиями импульсного энерговыделения, то колебания с малыми амплитудами, до нескольких сотен километров, наблюдаются в петлях практически всегда, в том числе во временные интервалы без какой-либо вспышечной активности. Оба режима колебаний наблюдаются в одной и той же петле, причем их частоты совпадают.

Для незатухающих колебаний с малыми амплитудами рассматриваются две возможности возмещения потери энергии, которая уходит на возбуждение крутильных колебаний и диссипативные процессы. Первая возможность заключается в том, что подвод энергии осуществляется быстрыми хаотическими горизонтальными движениями основной петли. Такие движения связаны с движениями фотосферных гранул. Вторая возможность – это автоколебания, в которых источником энергии являются стационарные или медленноменяющиеся течения, перпендикулярные петле.

Эффект автоколебаний можно проиллюстрировать колебаниями пружинного маятника, расположенного на равномерно движущейся поверхности, например на ленте конвейера.

Аналогично маятнику на статичной поверхности, период колебаний такого пружинного маятника определяется его массой и упругостью пружины. Трение между грузиком и лентой приводит к возбуждению колебаний. В результате пружинный маятник на движущейся ленте колеблется с постоянной амплитудой, которая определяется трением и скоростью движения ленты.

Автоколебания наблюдаются в самых разных природных и рукотворных системах. Например, в пульсирующих звездах цефеидах, в настенных часах, в любом радиопередатчике, работающем от источника постоянного тока, в мобильных телефонах, в человеческом сердце и в разнообразных духовых и струнных музыкальных инструментах. В частности, автоколебания корональных петель напоминают колебания струны скрипки в ответ на плавное движение смычка.

Способность обоих указанных механизмов поддерживать незатухающие колебания в солнечной короне подтверждена численным моделированием, но пока не уставлено, какой же из них реализуется.

СОЛНЕЧНЫЙ ОРГАН: АКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ПЕТЛЯХ

Еще один часто наблюдаемый в короне тип МГД-колебаний – это ММЗ-волны, для удобства часто называемые просто акустическими. Эти смещения сопровождаются возмущениями интенсивности излучения, которые вызваны колебаниями плотности плазмы. ММЗ-колебаниям, как правило, подвержены петли, заполненные относительно горячей плазмой, с температурой выше 4–5 млн К. В большинстве случаев акустические колебания оказываются стоячими волнами. В соответствии с теорией, наблюдается сдвиг по фазе на четверть периода между колебаниями интенсивности излучения и течений плазмы вдоль поля. Данная физическая картина напоминает звуковые колебания в трубках органа. Частота колебаний определяется отношением длины трубки петли и скорости звука. Поскольку скорость звука в солнечной короне существенно ниже альфвеновской скорости, то в петлях одинаковой длины характерные периоды стоячих ММЗ-волн в среднем длиннее периодов колебаний изгибных и достигают нескольких десятков минут. Тот факт, что более длинные периоды наблюдаются в более холодных, а значит с более низкой скоростью звука петлях, вполне соответствует теоретическим оценкам.

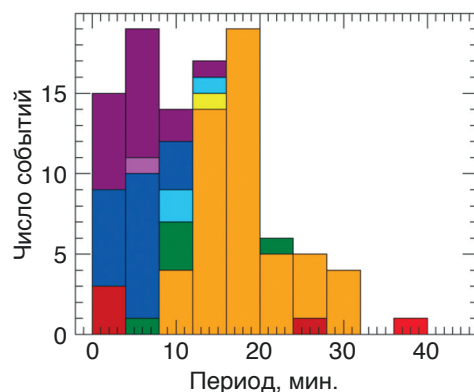
Амплитуды акустических колебаний достаточно высоки, и волны данного типа проявляют себя как периодические смещения плазмы вдоль петли. Скорость индуцированных течений плазмы может достигать половины скорости звука.

Так же как и изгибные колебания большой амплитуды, акустические колебания затухают крайне быстро, в течение нескольких периодов колебаний.

Наблюдаемые времена затухания существенно короче времени затухания, обусловленного теплопроводностью и вязкостью. Таким образом, очень важной представляется задача поиска более подходящих механизмов затухания. Одна из возможностей – это так называемый нелинейный каскад. Нелинейный каскад приводит к прогрессивному образованию в волне все более и более мелких масштабов (например, с этим эффектом связано обрушение волн на поверхности моря), которые затухают за более короткое время. Эффективность нелинейного каскада растет с увеличением относительной амплитуды волны (отношение амплитуды возмущаемой волной физической величины и ее равновесного значения). В случае акустических колебаний корональных петель прямое указание на возможную роль нелинейного каскада в их затухании – это наблюдаемая зависимость времени затухания от относительной амплитуды. Чем выше амплитуда колебания, тем быстрее оно затухает.

Распределение периодов стоячих акустических колебаний по температурам петель, в которых они наблюдаются.

Цвета: фиолетовый, сиреневый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый, красный и кирпичный соответствуют температурам в 14, 13, 12, 10, 8.9, 7, 6.3, 2 и 0.6 млн градусов



Кроме того, недавно установлено, что акустические волны сильно зависят от термодинамических процессов в короне, таких как баланс между охлаждением короны за счет излучения и ее нагревом неизвестным до сих пор механизмом. Данная зависимость открывает многообещающую возможность сейсмологической диагностики процессов нагрева.

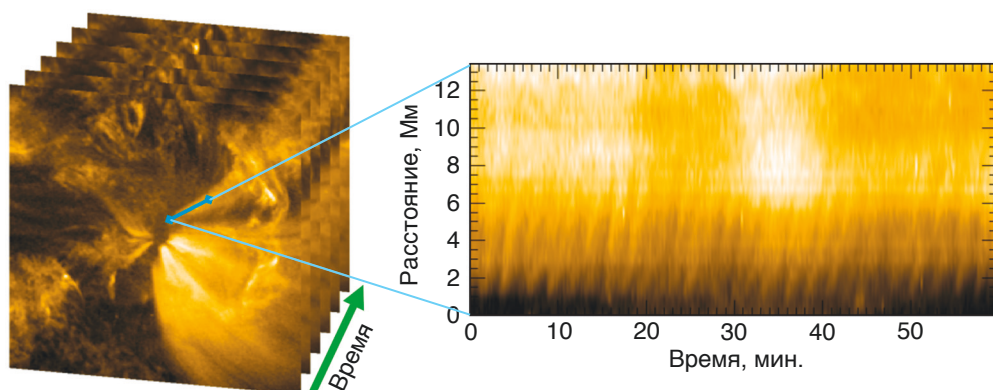
БАРАБАННАЯ ДРОБЬ В СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ

В корональных областях над солнечными пятнами часто наблюдаются акустические волны в виде бегущих вверх возмущений интенсивности КУФ-излучения. Лучше всего волны данного типа видны в ярких веерных структурах, расходящихся в корону из тени пятна. Стандартным методом их детектирования является построение пространственно-временных карт, получаемых для отрезков, расположенных вдоль направления распространения. На этих картах бегущие волны хорошо видны как ансамбли периодических диагональных линий.

Угол их наклона позволяет определить скорость распространения волны. Наблюдаемые скорости, в несколько десятков км/с, обычно ниже ожидаемых значений скорости звука, поскольку волна наблюдается под углом к направлению ее распространения. Наблюдаемое значение скорости есть произведение скорости звука и синуса угла между лучом зрения и направлением распространения. Данное объяснение подтверждено одним из немногих стереоскопических наблюдений акустических волн в корональных веерных структурах с помощью КУФ-телескопов на паре космических аппаратов *STEREO*, позволивших исследовать траекторию волны с различных направлений. Надежно установлено, что реальная скорость этих волн действительно близка к скорости звука.

Как правило, бегущие вверх возмущения интенсивности быстро затухают, достигая высот всего в несколько десятков тысяч километров над переходной зоной. С другой стороны, наблюдается корреляция между волновыми движениями в нижней части короны и периодическими процессами

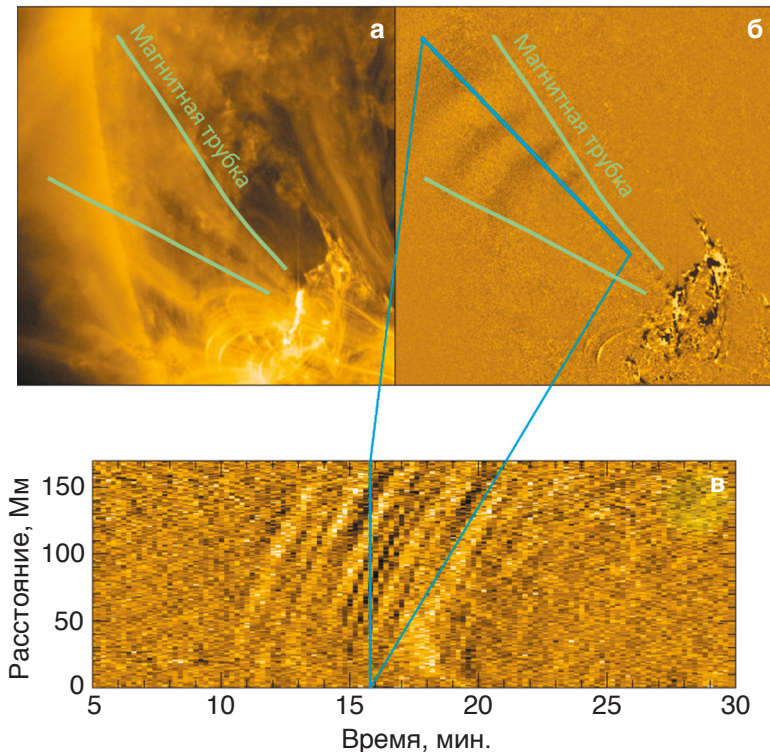
Пространственно-временная диаграмма ММЗ-волн, распространяющихся вдоль корональной петли, связанной с солнечным пятном (справа). Слева показана серия изображений активной области по наблюдениям инструмента SDO/AIA в окрестности линии 171Å. Диаграмма построена вдоль линии, отмеченной на изображении голубым цветом



в радиоизлучении солнечных вспышек, что указывает на то, что волновой сигнал в том или ином виде может достигать больших высот. Отражения и возвращения этих волн вниз не наблюдается. Волновые движения данного типа существуют в течение нескольких часов или даже дней. Период колебаний остается почти без изменений в течение всего времени существования. Таким образом, изменения интенсивности КУФ-излучения, наблюдаемые в нижней короне над пятном, являются практически монохроматическими, указывая на существование своеобразного акустического мазера.

И над солнечными пятнами разных размеров, и над более мелкими магнитными образованиями типа пор, период колебаний примерно одинаков – около трех минут. Колебания с трехминутными периодами хорошо известны в тени пятен в хромосфере. Периодические смещения хромосферы в вертикальном направлении напоминают колебания мембраны барабана. Хромосфера пятна пронизана уходящим вверх магнитным полем, по которому солнечная барабанная дробь выходит в корону в виде акустических волн, которые мы и наблюдаем как бегущие вверх периодические возмущения интенсивности излучения.

Бегущие БМЗ-волны в воронкообразной структуре (отмечена зелеными линиями) солнечной короны. Возмущения плазмы, мало заметные в исходных данных (а), становятся отчетливо видны на обработанных изображениях (б) после вычитания из данных всех медленноменяющихся деталей. На пространственно-временной диаграмме (в) БМЗ-волны проявляются в виде наклонных полос. Диаграмма построена вдоль линии, отмеченной на изображении голубым цветом



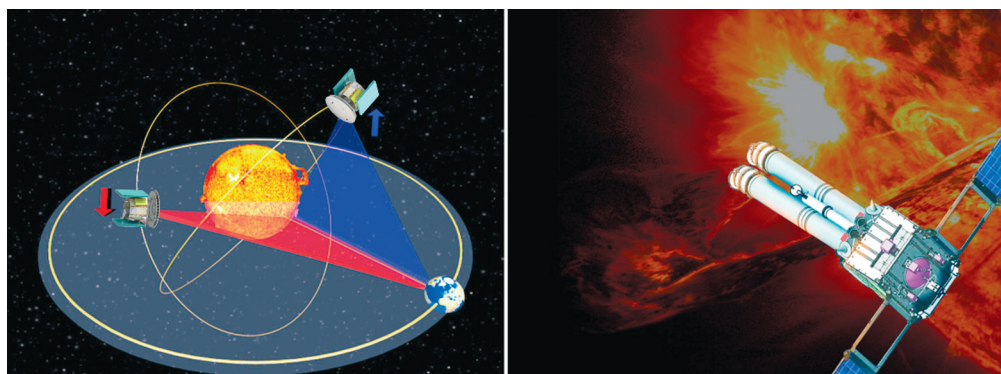
СОЛО НА ПЛАЗМЕННОЙ ТРУБЕ: ПАКЕТЫ БЫСТРЫХ МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЛН

Теоретически предсказанные периоды волн сосисочного типа существенно короче периодов изгибных и акустических волн. Поэтому колебания данного типа часто связываются с секундными периодическими вариациями радиоизлучения, генерируемого во время солнечных вспышек. Для более длинных периодов, в несколько десятков секунд, пространственное и временное разрешение инструмента *SDO/AIA* также позволяет регистрировать БМЗ-волны сосисочного типа. Это происходит потому, что временной шаг наблюдений (12 с) в несколько раз короче периода колебаний, а размер пространственного пикселя (около 400 км) в несколько раз меньше длины волны. Первые наблюдения сосисочных волн в КУФ-диапазоне, разрешаемых как во времени, так и в пространстве, были получены несколько лет назад. Возмущения интенсивности излучения наблюдались бегущими вверх в воронкообразных плазменных структурах, которые образованы локализованными внизу и расходящимися с высотой трубками магнитного потока.

Данное явление внешне напоминает музыкальные инструменты – трубу или горн. Характерные скорости превышают несколько сотен км/с, что полностью исключает их связь со скоростью звука, до двухсот км/с. Волновые возмущения данного типа длятся всего несколько периодов колебаний. Другими словами, они представляют собой волновые пакеты. Причем, в ряде наблюдений в передней части волнового пакета бегут колебания с более длинными периодами, а в задней части – более короткие.

Итак, наблюдения показывают волну возмущения интенсивности, бегущую вдоль предполагаемого направления магнитного поля со скоростью около альфвеновской. Такое возможно только для БМЗ-волны, направляемой вытянутой вдоль магнитного поля неоднородностью плотности плазмы. Модуляция, или изменение периода колебаний внутри волнового пакета, указывает на вероятную причину образования пакета волн. Причина эта связана с волновой дисперсией. Предположим, что волны возбуждаются импульсным источником, например вспышкой. Возбужденное таким образом возмущение содержит много спектральных гармоник, каждая из которых может рассматриваться как гармоническое

Иллюстрации двух основных планируемых в России космических миссий для исследования Солнца и околосолнечной межпланетной среды – «Интергелиозонд» (слева) и АРКА (справа)



колебание определенной частоты. Подобное разложение сигнала по гармоникам аналогично разложению белого света по цветам радуги. В волноводе волны с разными частотами или периодами колебаний бегут с разными скоростями, причем в МГД-волноводе более низкочастотные гармоники бегут быстрее, чем высокочастотные. Этим и объясняется наблюдаемое изменение периода колебаний со временем внутри волнового пакета: гармоники с более длинным периодом опережают короткопериодические. Траектории волн данного типа позволяют установить геометрию магнитного поля в активных областях короны. Некоторые свойства волн, например изменение периода колебаний и амплитуды внутри пакета, дают возможность определить тонкую пространственную структуру плотности плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

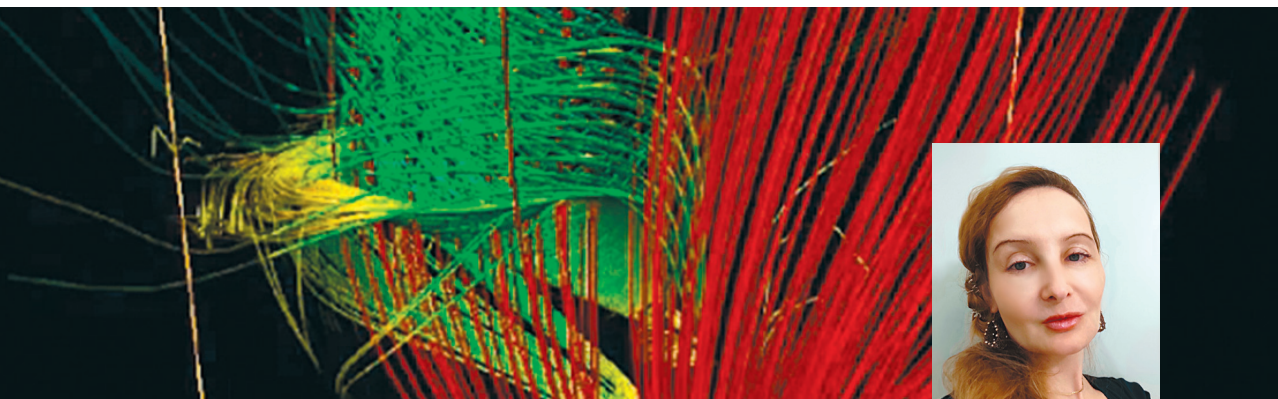
МГД-волны, наблюдаемые в короне Солнца, являются самыми длинными электромагнитными волнами во Вселенной, которые наши инструменты позволяют разрешить одновременно как во времени, так и в пространстве. Параметры волн позволяют получить уникальную информацию о физических параметрах плазмы короны. Это необходимо для построения моделей космической погоды и для предсказания экстремальных событий на Солнце, которые являются потенциально опасными для разнообразных космических и наземных технических систем. В декабре 2020 г. в условиях ограничений, связанных с COVID-19, состоялась международная онлайн конференция «МГД-сейсмология короны Солнца», привлекая более сотни участников с пяти континентов и 17 часовых поясов. Это свидетельствует о важности проблем, изложенных в настоящей статье.

Несмотря на то что многое уже известно о солнечной атмосфере, она все еще остается загадочным и непредсказуемым космическим объектом. Чтобы разгадать ее загадки и научиться прогнозировать ее активность с желаемой точностью, нужны новые более детальные наблюдения. Ученые и инженеры разных стран активно работают над усовершенствованием инструментов для наблюдений за Солнцем. В нашей стране тоже ведутся подобные разработки. Среди них выделяются два космических проекта – «Интергелиозонд» и АРКА, которые планируются к запуску после 2025 г. Первый проект состоит из двух космических аппаратов, которые должны приблизиться к Солнцу с разных сторон ближе чем Венера, и выйти из плоскости эклиптики. Это позволит наблюдать Солнце с различных направлений и определять трехмерную структуру исследуемых объектов (корональных петель, веерных структур, корональных дыр, KBM и пр.). Второй проект позволит наблюдать корону в нескольких КУФ-каналах с рекордным пространственным разрешением около 100 км, что меньше радиуса сечения петель, наблюдаемых в настоящее время. Ожидается, что оба проекта позволят получать новые сведения о солнечной атмосфере и, в частности, о МГД-волнах. Таким образом, мы сможем наслаждаться новыми плазменными симфониями и черпать из них вдохновение для совершения прорывов в исследовании и освоении космоса.

Рекомендованная литература

1. Богачев С.А., Кириченко А.С. Солнечные вспышки // Земля и Вселенная, 2013. № 5. С. 3–15.
2. Степанов А.В. Корональная сейсмология – эффективный метод диагностики звездных корон // Земля и Вселенная, 2008. № 1. С. 3–17.
3. Степанов А.В. Терагерцовое Солнце // Земля и Вселенная, 2020. № 5. С. 15–28.

ЗАЧЕМ СОЛНЦУ НАДО МАГНИТНОЕ ТОРНАДО?



ХАБАРОВА Ольга Валерьевна,

кандидат физико-математических наук

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН

DOI: 10.7868/50044394822010029

Магнитные торнадо – плазменные объекты, которые внешне очень похожи на торнадо в земной атмосфере, но наблюдаются на Солнце. Эти структуры были открыты почти сто лет назад, но стали предметом активных дискуссий в научной литературе лишь в последнее десятилетие. Растущие технические возможности наблюдений Солнца позволили разглядеть детали, необходимые для понимания природы магнитных торнадо. В статье обсуждается, откуда они берутся, как выглядят, как ведут себя и каким образом ученые исследуют свойства этих структур.

Солнце всегда привлекало внимание человечества. Его наблюдали астрономы с самых древних времен, пытаясь разгадать природу нашего светила и понять, как оно влияет на Землю. По мере развития техники в распоряжении ученых появлялись все более совершенные инструменты и приборы для наблюдений. Если смотреть на Солнце не через темные очки, а с помощью телескопа, который может «видеть» в крайнем ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного спектра (длины волн от сотни до десяти нано-

метров)¹, то можно заметить очевидное сходство солнечной атмосферы с бурлящей жидкостью.

Не секрет, что в кастрюле с закипающей манной кашей можно найти столько физики, что ее хватит на описание основных гидродинамических процессов движения вещества, в том числе и на Солнце. Однако есть в атмосфере

¹ КУФ-диапазон. См. в этом номере «Плазменная симфония или магнитогидродинамические волны в короне Солнца» Накаряков В.М., Зимовец И.В., Афиногентов С.А.

нашей звезды и такие явления, которые не воссоздать ни на какой кухне и даже в лаборатории на Земле. Причиной тому – огромные размеры Солнца, высочайшая температура, достигающая десятков миллионов градусов в короне, очень сильные магнитные поля в активных областях и, конечно, то, что на Солнце кипит не жидкость, а плазма.

На Солнце совмещаются и привычный для нас мир явлений, и совершенно фантастические процессы, которые трудно вообразить, не увидев с помощью специальной аппаратуры. Иногда солнечные образования только с виду похожи на земные, но их физическая природа совершенно иная. Поэтому когда Солнце «плюется» пузырями корональных выбросов массы – облаками плазмы, раздувающимися в космическое пространство, – их движение описывается не просто гидродинамикой, как в случае с булькающей кастрюлькой, а магнитной гидродинамикой.

Одно из таких явлений, вызывающих ассоциации с тем, что можно наблюдать на Земле, – это торнадо. Но не простое, а... магнитное. Сразу оговоримся, что солнечные магнитные торнадо пока еще очень мало изучены, но именно поэтому они привлекают особое внимание специалистов в последнее десятилетие. Да, солнечные торнадо выглядят почти так же, как и земные вихри, но какая физика стоит за этим кажущимся сходством? Самые маленькие из них намного больше нашей планеты, но наблюдаются и гигантские торнадо, простирающиеся на сотни миллионов километров.

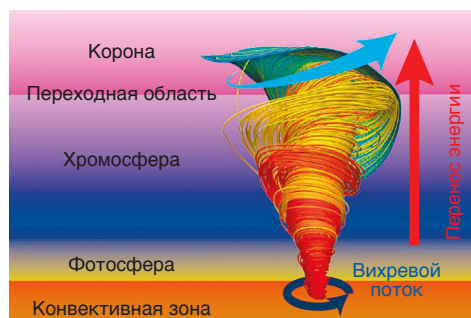
Структура магнитного торнадо, которое предположительно переносит энергию из конвективной зоны Солнца в солнечную корону (оригинал рисунка в статье Wedemeyer-Böhm et al., Nature, 2012)

Где и как искать на Солнце торнадо? Одинаковы ли они по природе? Откуда они берутся? Есть ли физические сходства между земными и солнечными торнадо? Давайте обсудим эти вопросы.

ТОРНАДО НА СОЛНЦЕ – СТРУКТУРЫ, ЗАБЫТЫЕ НА СТОЛЕТИЕ И ОТКРЫТЫЕ ЗАНОВО

Возможность того, что на Солнце могут возникать протуберанцы в виде торнадо спиральной формы, отмечал в своей работе еще в 1932 г. Эдисон Петтит (Edison Pettit), талантливый американский астроном начала XX века, чье имя носят теперь кратеры на Луне и Марсе. Долгое время считалось, что это лишь творческая фантазия Эдисона, поэтому торнадообразные структуры отдельно практически не изучались. Прошло почти столетие, за которое на тему торнадо на Солнце не было опубликовано и десятка работ. Однако за последнее десятилетие их количество исчисляется сотнями. Чем же вызван растущий интерес к магнитным торнадо?

Дело не только в увеличении числа ученых. Оказывается, в науке иногда достаточно назвать вещи своими именами, чтобы возродить или стимулировать интерес к явлению. Торнадный бум начался с наблюдения вращающейся как пропеллер структуры в хромосфере Солнца в 2011 г.



и с последовавшей за этим статьи 2012 г. Свена Ведемаейр-Бома (Sven Wedemeyer-Böhm) с соавторами во влиятельном научном журнале *Nature*, призванном обсуждать смелые предположения и находки. В работе утверждалось, что основа мини-торнадо – именно такие плазменные структуры, закручивающиеся в нижних слоях Солнца, которые затем вытягиваются вверх и достигают солнечной короны. Авторами были опубликованы результаты моделирования магнитных торнадо и предположения о природе нагрева короны.

С помощью мини-торнадо авторы пытались объяснить одну из главных загадок физики Солнца – почему корона, самый внешний слой солнечной атмосферы, намного горячее всех остальных слоев. Была выдвинута довольно простая идея: поскольку таких маленьких торнадо должно образовываться немало на границах циркуляционных ячеек конвективной зоны, они могут переносить снизу вверх значительную часть энергии Солнца. Предположение о таком механизме переноса энергии в корону как об основном в научном сообществе сочли слишком экстравагантным, а вот идею об образовании множества торнадо услышали и стали всерьез изучать вопрос, а есть ли вообще торнадо на Солнце.

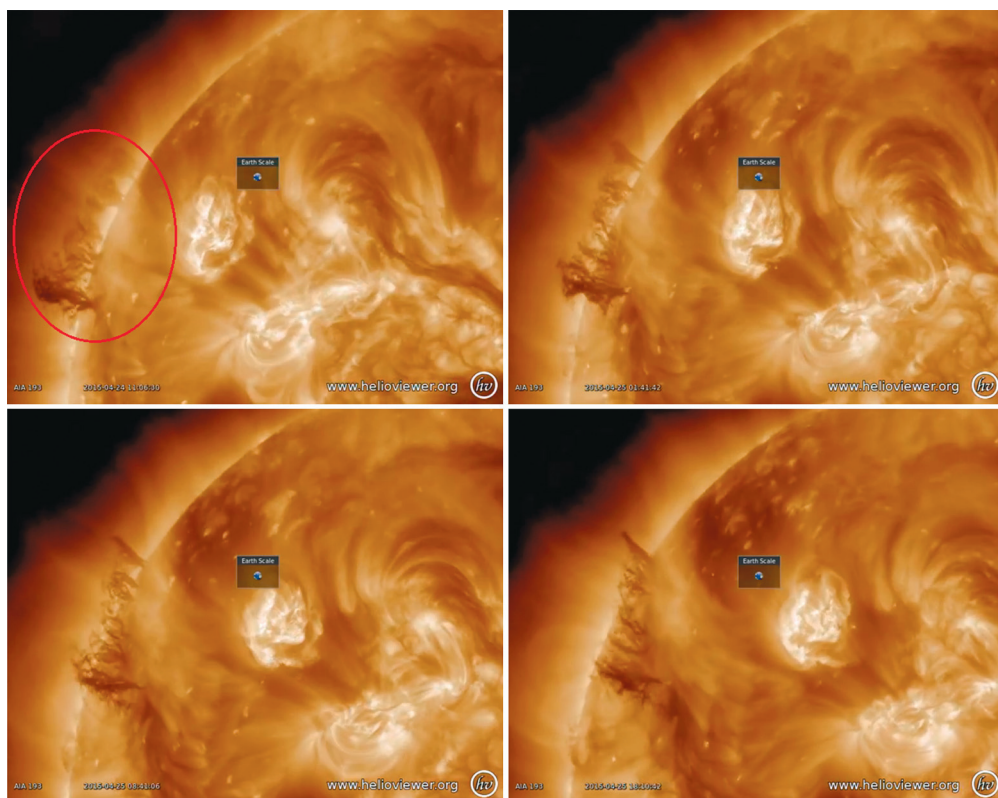
В научной среде развернулись острые дискуссии – а вдруг это оптический обман или, хуже того, стремление выдать желаемое за действительное? Вдруг никакой раскручивающейся вверх спирали торнадо нет, а есть только вращение некоторой структуры в плоскости наблюдения? Или мы видим обыкновенные вытянутые вверх протуберанцы, но не вращающиеся, а дрожащие?

В самом деле, есть опасность принять плоский вращающийся объект за объемный. Поскольку с помощью теле-

скопов мы получаем двумерные изображения Солнца, эффект проекции реальных трехмерных структур на солнечный диск иногда приводит к неверной интерпретации наблюдаемых картин. Оппоненты гипотезы Ведемаейр-Бома отмечали, что открытые им «вихри» гипотетически могли быть плоскими и не подниматься в верхние слои атмосферы в виде торнадо. Дело в том, что глядя на диск Солнца, невозможно понять, насколько изучаемый объект вытянут по вертикали и как именно он движется в трехмерной реальности. Если смотреть вдоль оси вращения и на структуру типа закручивающегося штопора, и на структуру типа плоского пропеллера, их проекции будут выглядеть одинаково. Таким образом, нельзя с уверенностью сказать, крутится ли плазма с замороженным в нее магнитным полем в плоскости диска или все-таки закручивается вверх как спираль штопора.

Во втором случае наблюдения могут быть неверно интерпретированы, если подъем плазмы вверх есть, но никакой закрутки нет, а иллюзию вращения создают сильные дрожания структуры. Иногда глаз может улавливать знакомые формы в хаотическом движении, но это лишь особенность человеческого мозга интерпретировать явления, а не реальность.

На этом дискуссия могла бы закончиться в тупик, однако решение проблемы «Реальность или игра воображения?» существует. Так, чтобы понять, вытянута ли структура на самом деле и вращается ли она, надо увидеть ее на лимбе (крае Солнца). Например, в короне иногда наблюдаются множественные протуберанцы, похожие на ветряные мельницы, выползающие из-за лимба или уходящие за него. Выглядит красиво, но что это? Горизонтальные вихри? Вряд ли. Эти протуберанцы больше напоминают сеть торнадо с закручивающейся



Протуберанцы, похожие на ветряные мельницы, наблюдавшиеся 23–29 апреля 2015 г. Объекты выстроились в ряд вдоль нейтральной линии магнитного поля. На соответствующем видео видны как хаотические колебания, так и вращение вертушек протуберанцев. Событие закончилось взрывообразным распадом структуры и выбросом плазмы. Изображения короны даны в канале 193 Å. (Данные Солнечной Динамической Обсерватории (SDO). Доступно на наблюдательном интернет-ресурсе Helioviewer)

плазмой или магнитным полем на границе какой-то вытянутой структуры, хотя анализ этого процесса в динамике показывает, что осцилляции и хаотическое движение в этих объектах тоже присутствуют. Таким образом, каждый подобный случай требует внимательного изучения, чтобы разделить истинное вращение и хаотическое (хотя преимущественно восходящее) движение плазмы вдоль линий магнитного поля, воспринимаемое глазом как вращение.

Ответом скептикам, которые не верили в реальность существования вращающихся структур на Солнце, яви-

лись публикации результатов наблюдений на лимбе. В этих работах вращение плазмы и закрученность линий магнитного поля были многократно подтверждены, в том числе с использованием оценок направления скоростей в разных частях торнадо (работы Хинг Ли (Xing Li) с соавторами в журнале *Astrophysical Journal* в 2012 г. и работы Янг Су (Yang Su) с соавторами в журнале *Astrophysical Journal Letters* в 2012 и 2014 гг.). Так появились указания на следующие факты. Во-первых, вещество в крупных магнитных торнадо действительно течет вдоль

закрученного магнитного поля, т. е. вращается вокруг главной оси торнадо. Во-вторых, некоторые из этих образований не стоят на месте, а их основание вращается (т. е. торнадо двигаются целиком, как и их земные аналоги).

Ведемаейр-Бом с соавторами вынуждены были выпустить в 2013 г. в журнале *Astrophysical Journal* статью с разъяснениями, что образование закрученных форм магнитного поля присуще многим структурам солнечной атмосферы, причем размеры структур могут отличаться на несколько порядков. Ученые попытались систематизировать и проанализировать имеющийся материал, уже опубликованный противниками и сторонниками идеи вращающихся магнитных полей. Они получили характерную зависимость «размер структуры – время жизни» и отметили, что в 2012 г. они говорили о маленьких магнитных торнадо, в то время как есть и гигантские. Самые мелкие плазменные образования, «уличенные» в наличии закрученного магнитного поля – спикеры размером до 100–1000 км – живут всего несколько минут. Время жизни обычных магнитных торнадо и вращающихся сложных конгломератов полей размерами до 10^4 км составляет от десятков минут до десятков часов, а торнадо, названные гигантскими, с размерами до 10^6 км и даже больше, могут выживать сутками.

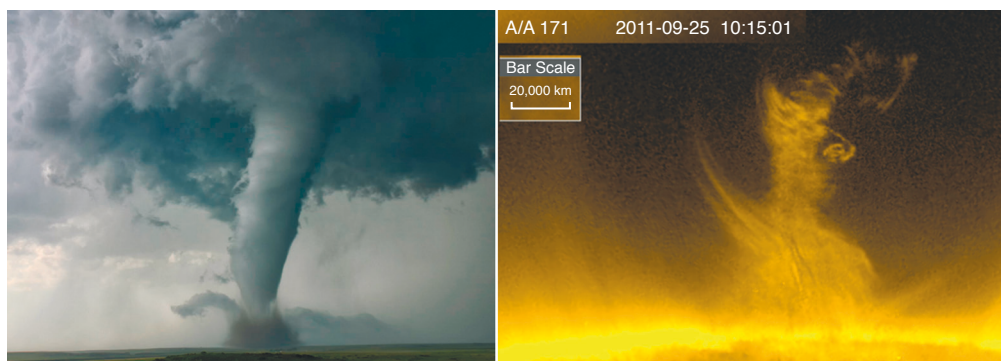
КАК УВИДЕТЬ СОЛНЕЧНЫЕ ТОРНАДО, И ЧЕМ ОНИ ПОХОЖИ НА ЗЕМНЫЕ?

Способность жидкостей и воздуха закручиваться в вихри и воронки порождает массу интересных явлений на Земле. Даже маленький вихрь, гоняющий пыль по двору, привлекает внимание. А уж от вида торнадо или смерчей просто невозможно оторваться, какого

бы размера они ни были. Земные торнадо – величественные проявления динамики воздушной среды, поражающие воображение человека, который внезапно осознает свое бессилие перед природой. Хорошее объяснение того, как формируются два основных типа торнадо в земной атмосфере, можно найти на youtube-канале научно-популярного журнала *National Geographic*. Торнадо и смерчи на Земле возникают на стыке атмосферных фронтов. «Рецепт», как получить торнадо, на первый взгляд прост. В распоряжении природы должны быть: (а) существенная разность давлений, (б) разность температур и влажности и (в) разность направления движения воздуха на различных высотах. Однако простота этих условий мнимая. По факту, торнадо очень капризные структуры, поскольку их формирование стохастично и зависит от взрывного развития вихревой неустойчивости. Так, при одинаковых начальных условиях торнадо иногда возникают, а иногда нет.

Физику появления и развития торнадо на суше и смерчей над поверхностью воды считают непростой. Но если земные торнадо хотя бы можно увидеть и «потрогать», т. е. понять, как они устроены и что в них происходит, поместив приборы непосредственно внутрь вихря, то солнечные торнадо можно наблюдать только дистанционно. Да и то с помощью спектроскопии, не в видимом диапазоне (в белом свете), а в определенных длинах волн – в крайнем ультрафиолете и рентгене, на которые приходится основное излучение короны Солнца.

Существенно помогают в этом Солнечная Динамическая Обсерватория (*Solar Dynamic Observatory, SDO*) и другие космические аппараты, находящиеся за пределами земной атмосферы. Например, на длине волны 171 Å, где в основном светятся ионы железа Fe^{9+}



Слева: торнадо над равниной в Америке. Вверху на фотографии облако-суперъячейка, из которого спустился до земли «хобот» торнадо. Кроме основного канала, видны ответвления у земли, которые обычно нестабильны (фото Ясона Персофф (Jason Persoff), предоставлено журналом *National Geographic*). Справа: магнитное торнадо на Солнце. Изображение Солнечной Динамической Обсерватории (SDO) в канале 171 Å. Для простоты восприятия изображение на рисунке повернуто. Исследователи будут видеть это торнадо в *Helioviewer* на лимбе в нижнем правом углу. Выделяется центральный канал, закрученная вокруг него структура магнитного поля и плазмы, а также закручивающиеся ответвления различного масштаба. Размер магнитного торнадо можно оценить с помощью шкалы, приведенной в левом верхнем углу правого рисунка. Ширина рассматриваемого гигантского торнадо около 20 тыс. км. Для сравнения, радиус Земли – около 6400 км

при температуре около 0.6–0.7 МК, видны структуры в короне и верхней части переходной области Солнца. Просканировав все Солнце и визуализировав результат (т.е. переведя данные в цвета, доступные человеческому глазу), мы можем увидеть магнитное торнадо в этих слоях солнечной атмосферы. Кроме этого, с помощью *SDO* нам доступны магнитограммы на уровне фотосферы. Они строятся на основе эффекта Зеемана – расщепления спектральных линий в магнитном поле – и очень полезны для понимания того, что происходит на Солнце.

Сравнивая по форме классическое земное торнадо, которое формируется из так называемого облака-суперъячейки над равниной, и солнечное магнитное торнадо, можно отметить, что земные и солнечные торнадо действительно похожи. Изображению солнечного торнадо, конечно же, не хватает объема и четкости по сравнению с земным.

Однако надо делать скидку на то, что между Солнцем и Землей почти 150 млн км, и что любые структуры, возвышающиеся над фотосферой, хорошо видны только на лимбе солнечного диска.

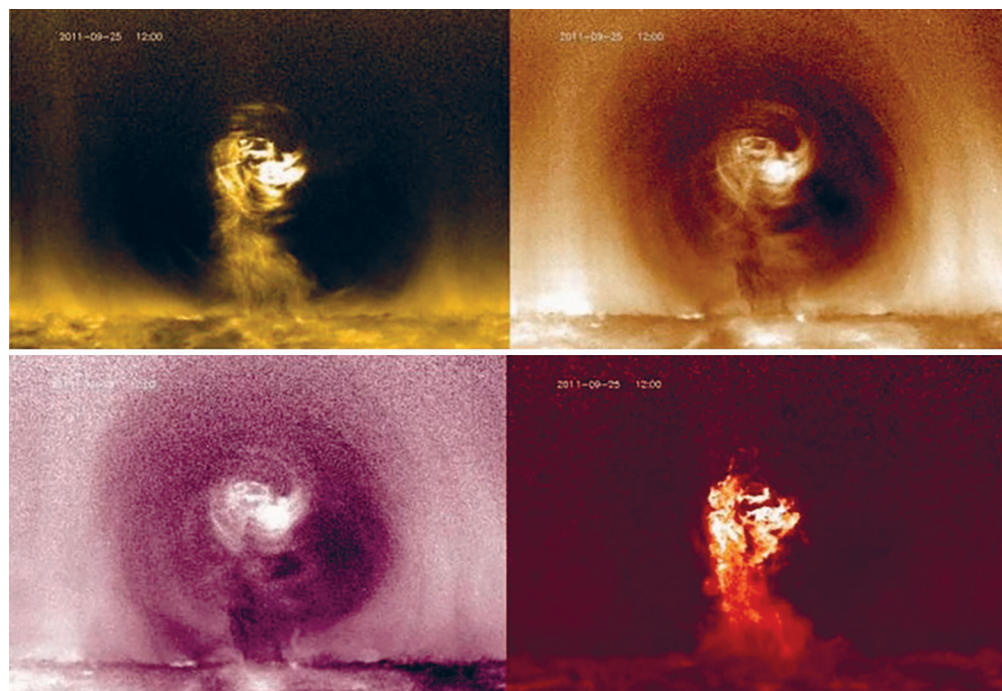
Любой желающий может найти на Солнце магнитное торнадо и отследить его динамику с помощью интернет-ресурса *Helioviewer*. Этот ресурс содержит базы изображений *SDO* и других аппаратов, наблюдающих за Солнцем в разных длинах волн. Работа с ресурсом *Helioviewer* проста: достаточно выбрать дату, поставщика данных (в нашем случае *SDO*), прибор и длину волны, и на экране появится изображение Солнца, соответствующее данной длине волны. Читателю полезно знать, что *Helioviewer* также позволяет создавать фильмы, что открывает широкие возможности для любителей физики Солнца исследовать разные структуры и связанные с ними динамические процессы.

Необходимость просмотра последовательности изображений с целью различить вращение структуры – важный аспект изучения магнитных торнадо. Другими словами, изображения надо склеить в видео. И дальше желательно проанализировать это видео не только глазами, но и с помощью нейронных сетей и программ распознавания образов. При этом для серьезного научного анализа требуется одновременно и собирать информацию о морфологических изменениях изучаемого объекта во времени, и сопоставлять кадры изображений с данными по магнитному полю в той же области на уровне фотосферы, и даже моделировать движение плазмы в торнадо. Так, например, был обнаружен интересный факт, что цепь

магнитных торнадо обычно локализуется на линии локальной смены полярности магнитного поля – так называемой «нейтральной» линии.

Помимо канала с длиной волны $171 \text{ \AA}$ ($17,1 \text{ нм}$), торнадо на Солнце можно наблюдать и в каналах от $131 \text{ \AA}$ до $335 \text{ \AA}$. В каждом из них светятся разные ионы при разной температуре, поэтому изображения будут отличаться и давать возможность отследить какие-то новые детали и особенности процесса. Подробности получения изображений в разных длинах волн изложены на официальном сайте *SDO*. Там же можно найти информацию о том, при какой температуре светятся определенные ионы, и какой длине волны в наблюдениях *SDO* соответствует

То же торнадо, что и на рис. 3, но в другой момент времени (12:00), снятое в разных каналах (длинах волн). Слева направо: $\text{Fe}8+$ на длине волны $171 \text{ \AA}$ (температура $0,8 \text{ MK}$); $\text{Fe}11+$ ($193 \text{ \AA}$, $1,5 \text{ MK}$) – верхняя панель; $\text{Fe}13+$ ($211 \text{ \AA}$, $1,8 \text{ MK}$) и $\text{He}1+$ на длине волны $304 \text{ \AA}$ (температура 104 K) – нижняя панель. Снимки получены Солнечной Динамической Обсерваторией (*SDO*). Последовательность как в работе Li et al., *ApJ*, 2012



определенный слой солнечной атмосферы.

Прежде всего, обращает на себя внимание то, что солнечные торнадо называли так не зря. Закрученная структура плазмы часто видна на изображениях *SDO* довольно четко. Если с помощью *Helioviewer* посмотреть видео, демонстрирующее эволюцию конкретного торнадо во времени, становится очевидным сложное вращательное движение плазмы вокруг узкого канала (работа Хинг Ли с соавторами, 2012 г.)

Со стороны это выглядит аналогично движению воздуха, влаги и захваченной пыли в земном торнадо. Важным сходством можно считать то, что центральный канал магнитного торнадо заполнен веществом с пониженной температурой. То же самое наблюдается и в земных торнадо: резкое падение температуры и плотности воздуха – основная причина так называемой «зоны смерти» внутри торнадо и смерчей.

Размеры гигантских торнадо – от десятков тысяч километров. Одно такое торнадо в десятки раз больше Земли. Диаметр земных торнадо – обычно порядка 100–1000 метров. Но главная разница между земными и солнечными торнадо не в размере, а в том, что движение плазмы в магнитных торнадо намного сложнее, чем воздуха – в земных торнадо. Некоторые магнитные торнадо вращаются вокруг своей оси как целое, а в некоторых вдоль спирали течет вещество, но сами торнадо не показывают признаков вращения. В некоторых торнадо есть явные осцилляции и расслоения, а некоторые устроены гораздо проще. Требуются дальнейшие исследования, в том числе теоретические, чтобы понять, от чего зависит динамика вещества в магнитных торнадо.

Земные торнадо известны частым появлением торнадо-спутников, ответвлений или языков. Аналогичную

картину мы видим и у солнечных торнадо. Образования типа длинных рукавов и узких закрученных жгутов солнечных торнадо, как и в случае земных торнадо, – короткоживущие. Однако их наличие говорит о том, что, во-первых, не надо забывать о неустойчивостях, стремящихся развалить такие структуры, а во-вторых, о силах, ответственных за образование торнадо, т.е. силах, которые управляют их рождением и гибелью.

ОТКУДА БЕРУТСЯ И КАКИЕ БЫВАЮТ МАГНИТНЫЕ ТОРНАДО?

Какие же силы порождают солнечные торнадо? В случае земных торнадо, это знакомые нам «солнце, воздух и вода» и приложенные к ним законы геофизической гидродинамики. А что движет магнитными торнадо? Для этого надо вспомнить некоторые базовые понятия о том, как устроена жизнь Солнца с точки зрения физики. Солнце часто принято считать раскаленным газовым шаром. Но это не простой газ. Это плазма. Причем, если говорить о ее свойствах, то ближе к поверхности Солнце напоминает многослойный торт.

Первая ассоциация, которая приходит в голову при взгляде на верхние слои Солнца, – это кипящая лава или, как говорилось выше, какая-то манная каша с лопающимися пузырями. Как ее можно изучать и даже что-то вычислять и предсказывать ее поведение? На самом деле, за видимым хаосом стоит строгий порядок, который не всегда поддается полному пониманию и моделированию в силу сложности системы, но некоторые взаимосвязи известны довольно точно.

Например, уже давно стало ясно, что поведение солнечной плазмы подчиняется законам магнитной гидроди-

намики. Другими словами, на Солнце можно ожидать увидеть все явления, которые есть в гидродинамике. И даже намного больше, поскольку солнечная атмосфера – это плазма, замешанная на магнитных и электрических полях. Ниже переходной области поведение магнитного поля преимущественно определяется движением плазмы. А вот выше переходной области всем управляет магнитное поле, а плазма имеет специфическое свойство быть в него «вмороженной». На первый взгляд, этот термин может показаться странным – какой же мороз на Солнце? Однако речь идет всего лишь о своеобразной связи вещества с магнитным полем («потянешь» за линию магнитного поля, за ней «потянется» и плазма). Если учитывать, что на Солнце действуют одновременно не только магнитогидродинамические эффекты, но и гравитация, и электродинамика, то становится понятным богатство динамической картины солнечной атмосферы, наблюдаемой в разных длинах волн с Земли и из космоса.

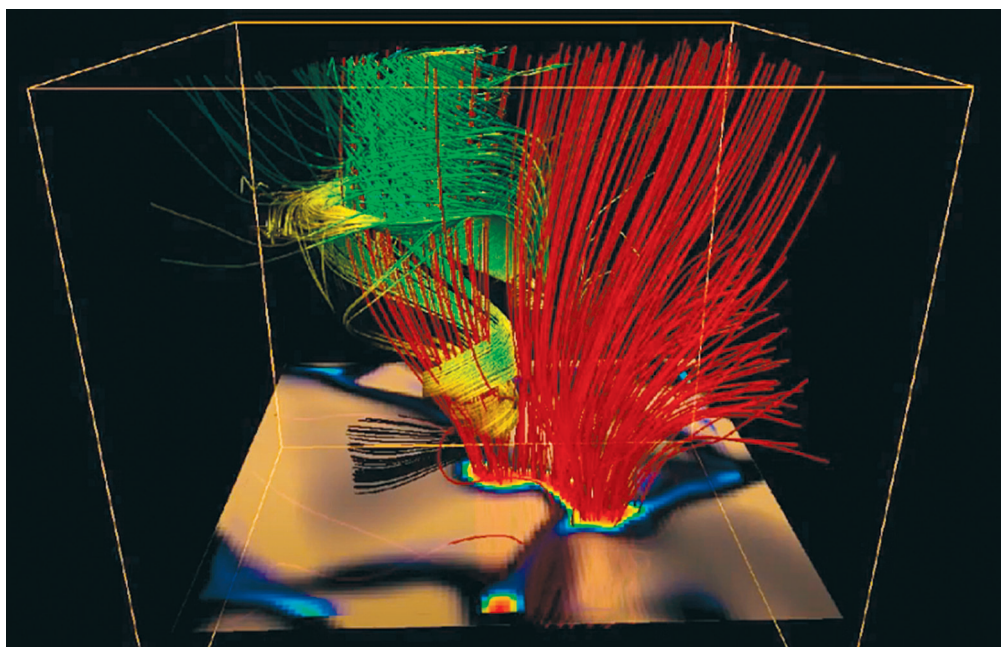
В практическом плане интерпретации изображений структур на Солнце это дает понимание, что если плазма потекла куда-то в короне, она течет вдоль линий магнитного поля, а на уровне фотосферы, наоборот, вещество оказывает сильное влияние на магнитное поле. Поскольку есть методы, позволяющие измерить магнитные поля на Солнце, то совместный анализ изображений на разных высотах, получаемых солнечными магнитографами и коронографами в сочетании с моделированием магнитогидродинамических процессов, неплохо позволяет восстановить последовательность событий и их физическую природу. Итак, упрощенно картина выглядит следующим образом: чтобы получить магнитное торнадо на Солнце, надо либо методично крутить плазму в нижних слоях

солнечной атмосферы, либо «завивать» в спираль магнитное поле в более высоких слоях.

Первый рецепт, использованный Велдемайер-Бомом с соавторами при построении численных моделей, заключается в следующем. Достаточно вспомнить, что на Солнце есть вертикальное круговое движение плазмы в так называемых конвективных ячейках (практически как в кастрюле с закипающей водой). Горячая плазма в конвективной зоне поднимается вверх, охлаждается на поверхности Солнца (в фотосфере) и ныряет вниз по контуру ячейки. Поскольку ячейки трехмерные, этот процесс, происходящий на краях соседних ячеек, может создать эффект водоворота, когда вода закручивается в водостоке в воронку под действием силы тяжести.

Чтобы понять, как работает этот эффект, желающие могут провести эксперимент «торнадо в бутылке» самостоятельно: наполнить ее водой, перевернуть открытую бутылку и закрутить. Результатом будет вихрь внутри бутылки. Подобным образом возникает и плазменный вихрь. Поскольку на Солнце есть и магнитное поле, его линии на высоте фотосферы и конвективной зоны следуют за плазмой, тоже закручиваются, но в то же время вытягиваются вверх в фотосферу, создавая магнитную спираль. В хромосфере же роль магнитного поля начинает расти и постепенно становится доминирующей, и теперь уже спиральное магнитное поле заставляет плазму крутиться. В итоге рождается магнитное торнадо.

Второй рецепт связан с нейтральными линиями (или, скорее, поверхностями) магнитного поля на Солнце, разделяющими локальные поля разного знака. Условно говоря, поскольку линии магнитного поля по обе стороны такой поверхности образуют арки, при определенных условиях может



Рождение магнитного торнадо из-за вращения плазмы на уровне фотосферы и дальнейшего вытягивания вверх и закручивания линий магнитного поля на уровне хромосферы и короны (компьютерное моделирование Ведемаейр-Бома). Иногда такие торнадо называют гигантскими, но речь идет о сравнении их размеров с Землей. В масштабах Солнца – это маленькие магнитные торнадо

возникнуть тот же эффект водоворота или воронки в бутылке, т.е. сваливания плазмы вниз и ее закручивания. Кроме того, вращение вещества в ячейках по разные стороны от нейтральной линии может приводить к созданию сложной сети перезапускающихся линий магнитного поля и интенсивному закручиванию магнитных полей над каждой ячейкой (гипотеза упомянутого выше Янг Су, 2014 г.). Есть предположения, что с участием магнитных сепараторов рождаются и крупные магнитные торнадо, и сеть мелких торнадо.

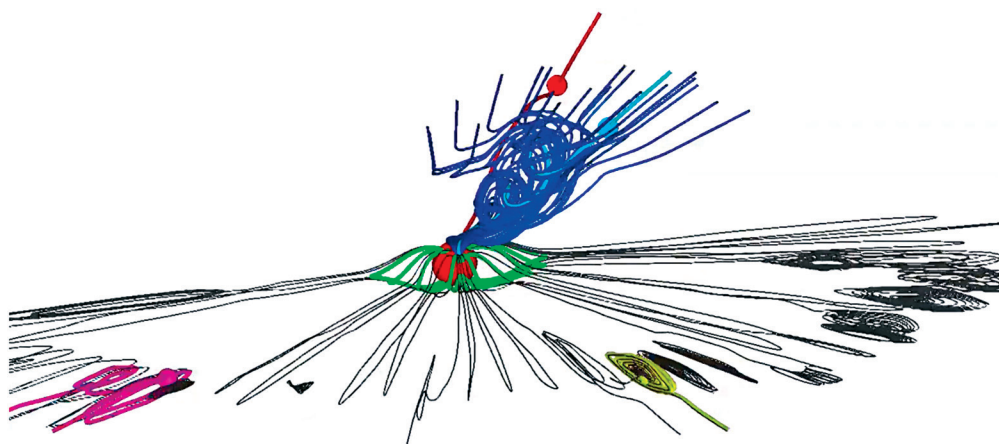
В качестве крупномасштабного торнадо со временем жизни порядка нескольких десятков часов можно рассматривать и торсионную (вращающуюся) альфвеновскую волну в полярных областях Солнца. Ее образование изучали Хиггинсон и Линч (Higginson and

Lynch) в 2018 г., опубликовав результаты своего трехмерного моделирования в журнале *Astrophysical Journal*. Механизм возникновения такой волны сложен и связан с магнитным пересоединением, присутствием на Солнце корональных дыр, а также нейтральных поверхностей магнитного поля.

Корональные дыры – это области атмосферы Солнца с преимущественно открытыми силовыми линиями магнитного поля, которые вытягиваются рукавами в солнечный ветер на несколько астрономических единиц. Они намного холоднее и разреженнее окружающей плазмы, но при этом они являются долгоживущими источниками высокоскоростных потоков плазмы в гелиосфере. В минимуме 11-летнего цикла солнечной активности корональные дыры выглядят в мягком

рентгене и крайнем ультрафиолете как черные шапки или широкие провалы в яркой короне, покрывающие полярные области (хотя иногда они могут занимать и пол-Солнца). С увеличением активности корональные дыры сползают с полюсов к солнечному экватору.

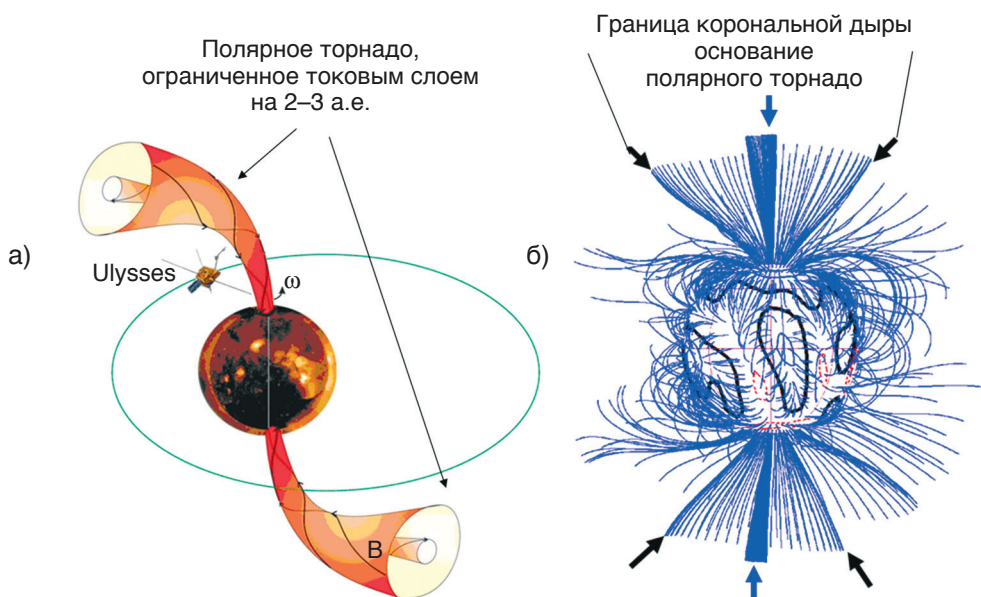
гелиоширотах эти линии оказываются наверху и в течение нескольких часов закручиваются в полярных областях в волну, напоминающую торнадо. Одновременно с указанным процессом в нижних широтах вдоль гелиосферного токового слоя от Солнца разбегаются многочисленные плазмоды.



Трехмерное моделирование образования торсионной альфвеновской волны в полярных гелиоширотах и плазмодов вблизи магнитного экватора в результате множественного магнитного пересоединения (Хиггинсон и Линч, статья в журнале *Astrophysical Journal*, 2018 г.) Солнце – большой красный шар в центре. Маленькие шары – виртуальные космические аппараты, расположенные на расстоянии 21 солнечного радиуса и использованные в моделировании для отслеживания положения линий магнитного поля и их связи с источником. Торсионная волна в полярной области показана синим. Плазмоды, которые распространяются вдоль гелиосферного токового слоя, выглядят как клубки ниток (запутанных линий магнитного поля) внизу рисунка

Торсионная волна на полюсе возникает в минимуме солнечной активности в области корональной дыры следующим образом. Изначально линии магнитного поля, которые впоследствии формируют волну, вытянуты вдоль главной нейтральной линии Солнца (магнитного экватора) и ее продолжения – гелиосферного токового слоя, который лежит приблизительно в области эклиптики. Однако из-за множественных актов пересоединения линий магнитного поля на нижних и средних

Последний из известных на данный момент видов гигантских магнитных торнадо был обнаружен недавно и практически случайно. В процессе поиска конических токовых слоев внутри полярных корональных дыр выяснилось, что такие токовые слои – это всего лишь «фантики», в которые завернуты «конфеты» – структуры с вращающимся магнитным полем, вытянутые далеко в гелиосферу. Дело в том, что в минимуме солнечной активности полярные области сильно от-



Полярные конусообразные токовые слои, ограничивающие торнадообразные структуры в солнечном ветре. а – Вращение магнитного поля в магнитных торнадо и их схематическое пересечение с орбитой космического аппарата Ulysses; б – Восстановленная картина линий магнитного поля в короне Солнца, типичная для минимума 11-летнего цикла солнечной активности. Над полюсами образуется конусообразное сгущение линий магнитного поля, предположительно очерчивающее конический токовый слой. В его основании лежит круговая нейтральная линия. Закручивание линий магнитного поля происходит либо в короне, либо выше (оригинал рисунка в статье Khabarova et al., *Astrophysical Journal*, 2017)

личаются по своим свойствам от нижних гелиоширот. В 2008 г. известный южно-африканский теоретик Реньяр Бюргер с соавторами показал, что внутри полярных корональных дыр должна существовать особая область конической формы, возникающая из-за того, что магнитная ось и ось вращения Солнца не совпадают. Предсказание было сделано для нескольких радиусов Солнца, и дальнейшая судьба этой области не обсуждалась. Однако было ясно, что, поскольку ее граница является магнитным сепаратором, на ней должен формироваться токовый слой.

Токовые слои могут возникать в полярных областях также и из-за недипольности магнитного поля Солнца.

Например, если учесть слабую квадрупольную компоненту и наложить квадруполь на диполь, то выяснится, что в полярных регионах возникают особые зоны, в которых должны быть магнитные сепараторы. На схеме магнитных полей это будет забавно выглядеть: как два маленьких «уха Микки-Мауса» вверху Солнца и два внизу (поле квадруполя) поверх двух больших «ушей Чебурашки», олицетворяющих поле диполя. В тех «провалах», где поля окажутся разнонаправленными, обязательно возникнут особые области с нейтральной поверхностью.

Обычно на магнитных сепараторах и нейтральных поверхностях формируются токовые слои, как, например, на магнитном экваторе или границе

корональной дыры. Возникает вопрос: выживают ли они, вытягиваясь в космическое пространство, как гелиосферный токовый слой – продолжение главного магнитного экватора Солнца? Автору этой статьи с коллегами удалось показать с помощью данных аппарата *Ulysses* в работе 2017 г., опубликованной в журнале *Astrophysical Journal*, что в полярном солнечном ветре существуют конические токовые слои. Само по себе обнаружение таких структур представляет значительный интерес, потому что длительное время считалось, что токовые слои в солнечном ветре бывают только плоскими. Но еще более неожиданным фактом оказалось то, что магнитное поле внутри этих токовых слоев закручено, как в магнитных торнадо! Кроме того, выяснилось, что скорость там падает, а плазма управляется магнитным полем, как будто космический аппарат оказался в пространстве вблизи Солнца, а не на расстоянии 2–3 а.е. от него.

Важно отметить, что *Ulysses* – единственная космическая миссия, имевшая орбиту, почти перпендикулярную плоскости эклиптики, на которую аппарат вышел за счет гравитационного маневра в поле тяготения Юпитера. Вся информация о полярном солнечном ветре, которая есть в распоряжении человечества, получена этим космическим аппаратом. Именно с помощью *Ulysses* выяснилось, что над полюсами в минимуме солнечной активности формируются магнитные торнадо с закрученным магнитным полем, ограниченные коническими токовыми слоями. Их размер – около одной десятой размера корональной дыры, в которой они находятся.

Есть предположение, что здесь первично именно существование конического токового слоя, а линии магнитного поля с легкостью закручиваются внутри в связи с тем, что этот процесс происходит в полярных областях

практически вдоль оси вращения. Косвенным доказательством этого может являться то, что внутри корональных дыр найдены круговые нейтральные линии (работы Клой Генну и Лаурел Ракмелер (Chloé Guennou, Laurel Rachmeler) с соавторами в 2015–2016 гг.).

Как показали наши исследования, в картине линий магнитного поля в короне Солнца, восстановленных с помощью пересчета магнитного поля на фотосфере в верхние слои солнечной атмосферы, в минимуме солнечной активности четко видны границы корональных дыр и узких конусов ближе к полюсам. Такие конусы существуют на протяжении всей фазы минимума солнечной активности и исчезают, когда корональная дыра спускается на средние гелиошироты в фазе роста. По-видимому, устойчивость полярных конических токовых слоев определяется положением материнской корональной дыры. В верхних широтах конические магнитные структуры называются «защищенными» стенками корональной дыры, которые тоже представляют собой токовые слои. По мере того, как корональная дыра спускается от полюса к экватору в ходе цикла солнечной активности, соосность конического токового слоя вблизи оси вращения и корональной дыры постепенно уменьшается. Как результат, конические магнитные образования в какой-то момент оказываются слишком слабыми, чтобы существовать самостоятельно длительное время. Возможны и другие причины образования и пространственно-временной эволюции конической выделенной области внутри корональных дыр, превращающейся в солнечном ветре в вихрь. Гигантские долгоживущие магнитные торнадо в солнечном ветре, ограниченные токовыми слоями, – самые малоизученные из всех.

ЧТО ДАЛЬШЕ?

Магнитные вихри на Солнце часто оказываются вовлеченными в процессы магнитного пересоединения и выбросов вещества из короны, а крупномасштабные долгоживущие магнитные торнадо в солнечном ветре неизбежно оказывают влияние на динамику плазмы и полей в гелиосфере. А раз так, свойства таких структур требуют дальнейших многосторонних исследований, включая сотрудничество специалистов как по физике плазмы, так и по земным торнадо.

Совместные усилия теоретиков в области физики Солнца, физики гелиосферы и специалистов по численному моделированию помогут представить различные сценарии образования и развития гигантских магнитных торнадо в солнечном ветре, их ключевые признаки, которые можно было бы подтвердить и изучить экспериментально. Необходимо тщательное планирование будущих космических миссий, подобных *Ulysses*, способных изучать гелиосферу вне плоскости эклиптики, уже с опорой на полученные новые знания и методы диагностики плазмы, чтобы понять, как устроены магнитные торнадо, способные выходить за пределы солнечной атмосферы. Все это вопросы ближайшего будущего космической физики.

В заключение хочется отметить, что единого мнения о свойствах и природе магнитных торнадо нет до сих пор. Постоянно появляются все новые работы в обоих «лагерях» – тех, кто считает торнадо осцилляциями и обманом зрения, и тех, кто разными способами доказывает наличие вращения плазмы вокруг оси торнадо.

Логично предположить, что на Солнце есть и то и другое в разных видах и на разных масштабах. И даже если

хоть какая-то часть образований на Солнце представляет собой достигающие короны объекты со спиральным магнитным полем и вращающейся вдоль него плазмой, либо вращающиеся как целое, мы наконец можем сказать: «А все-таки они вертятся!» А еще можно порадоваться, что рано или поздно все забытое переоткрывается заново на новом уровне. Это дает основание надеяться на спиральность развития науки, а не на бег по кругу. Почти как в торнадо.

Литература

1. Wedemeyer-Böhm, S. et al. Magnetic tornadoes as energy channels into the solar corona. *Nature* 486, 505–508 (2012).
<https://doi.org/10.1038/nature11202>
2. Xing Li et al. A Solar Tornado Observed by AIA/SDO: Rotational Flow and Evolution of Magnetic Helicity in a Prominence and Cavity, *ApJL*, 752, L22, (2012).
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/752/2/L22>
3. Wedemeyer, S. et al. Are Giant Tornadoes the Legs of Solar Prominences? *ApJ*, 774, 123, (2013).
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/2/123>
4. Khabarova O.V. et al. High-latitude conic current sheets in the solar wind, *ApJ*, 836, 108, (2017).
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/108>

Ссылки на видеоресурсы

https://www.youtube.com/watch?v=j41D_IOSbbc – наблюдение мини-торнадо, которое обсуждалось в статье Свен Ведемайер-Бомы (Wedemeyer-Böhm et al., *Nature*, 2012)

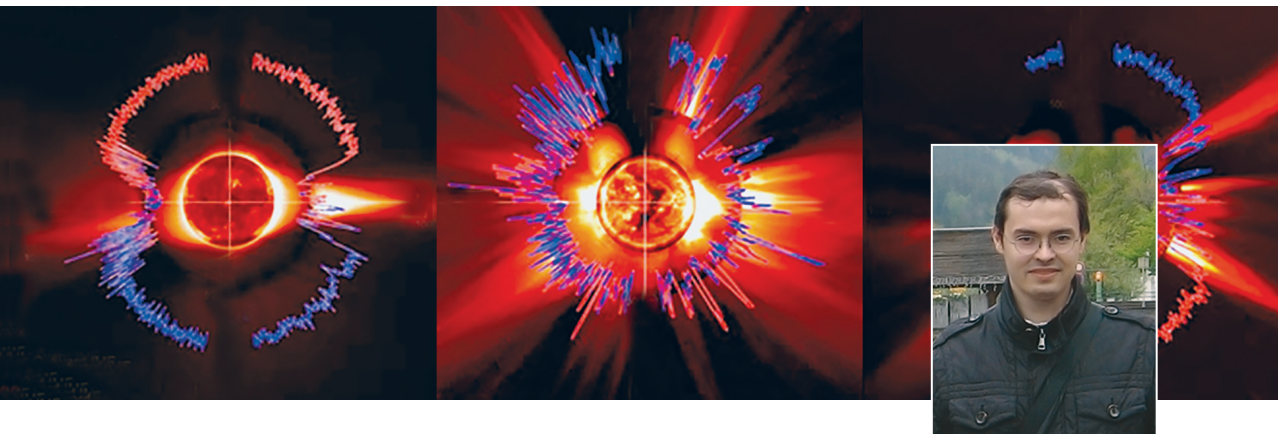
<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=U5wQFYDE9I> – протуберанцы – «мельницы», потенциальные магнитные торнадо

<https://helioviewer.org> – наблюдательный ресурс, позволяющий глядеть на Солнце в разных длинах волн

https://www.youtube.com/watch?v=D_f84nIB9J8 – компьютерное моделирование магнитного торнадо Ведемайер-Бомы, анимация Рис. 5

<https://www.youtube.com/watch?v=WwR16D48IVA> – анимация моделирования образования торсионной альфвеновской волны в полярных гелиоширотах, Рис. 6 (из статьи Хиггинсон и Линч, 2018).

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР И ТОКОВЫЕ СЛОИ: КЛАССИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И НОВЫЕ ОТКРЫТИЯ



КИСЛОВ Роман Анатольевич,

кандидат физико-математических наук

Институт космических исследований РАН,

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

DOI: 10.7868/50044394822010030

Представления о токовых слоях и солнечном ветре развивались синхронно. Фундамент современных знаний о них заложили в 1950-е и 60-е гг. советские и американские ученые. За полвека развития наши знания о гелиосфере, токовых слоях и плазме углубились, но работы отцов-основателей столь удачно смогли передать основные черты наблюдаемых явлений, что и сейчас любое отклонение от старых моделей воспринимается научным сообществом как нетривиальное, несмотря на накопившиеся противоречия и новые результаты, о которых ниже пойдет речь.

СОЗДАНИЕ ПЕРВЫХ МОДЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В 1930–40-е гг. считалось, что атмосфера Солнца находится в гидростатическом равновесии. Разумеется, было известно о существовании вспышек на Солнце, солнечной активности (пятна на Солнце видел еще Галилей). Было понимание, что межпланетная среда

заполнена плазмой солнечного происхождения. Иначе оказалось бы невозможно объяснить полярные сияния. Тем не менее спокойному Солнцу отказывали в наличии крупномасштабных течений. По оценкам из работ 40-х и начала 50-х гг., Солнце постепенно теряло массу со скоростью около $5 \cdot 10^{17}$ г/год за счет тепловых потерь. Из-за действия вихревых электромагнитных полей и столкновений некоторые частицы разгонялись до достаточных скоростей, чтобы, преодолев при-

тяжение Солнца, улететь в межпланетное пространство. $5 \cdot 10^{17}$ г/год – это очень немного с современной точки зрения. При типичной концентрации плазмы на орбите Земли вне магнитосферы 2 см^{-3} скорость потоков плазмы от Солнца оказалась бы 50–60 км/с вместо реальных 300–500 км/с. Старые модели, которые предсказывали столь медленное истечение плазмы, в результате получили название моделей солнечного бриза. В докосмическую эпоху было невозможно проверить их правильность прямыми измерениями. Хотя наблюдения за рассеянием электромагнитных волн, в частности за зодиакальным светом, позволяли оценить концентрацию косвенно. Она обычно оказывалась завышенной, так как рассеяние происходило на неоднородностях с повышенной плотностью. Скорость потоков удавалось оценить по отклонениям кометных хвостов, в начале 50-х особенно были известны работы Бирмана по данной тематике. Противоречия назревали, хотя в то время сосуществовали различные интерпретации наблюдений. В 1955 г. в ответ на типичную для того времени статью Мустеля «Проблемы истечения вещества из стационарных звезд» советские ученые опубликовали ставшую знаменитой работу¹. Они показали, что гидростатическое равновесие в атмосфере Солнца невозможно, тем самым вступив в спор со многими выдающимися коллегами, включая В.Б. Шкловского и С.Б. Пиккельнера.

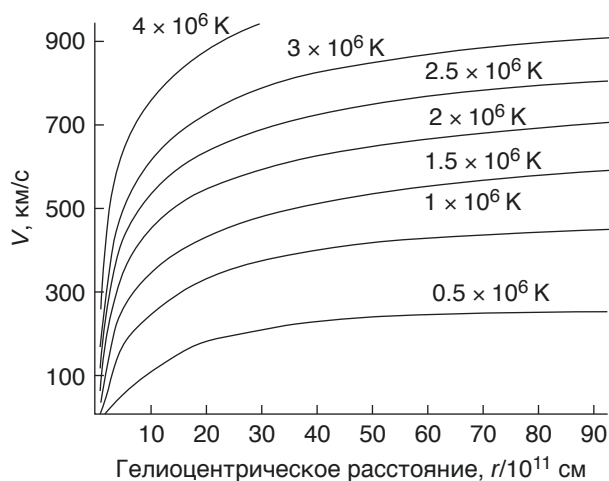
До 1955 г. не учитывалось, что функция распределения протонов и электронов по скоростям в короне может быть не сферически-симметричной. Для сферически-симметричной функции распределения поток плазмы

через замкнутую поверхность вокруг звезды всегда равен нулю и предыдущие работы фактически постулировали отсутствие быстрого течения плазмы от Солнца. Пономарев и соавторы отметили, что если допустить, что функция распределения может иметь малую направленную часть, то помимо потока вещества будет и поток энергии. Вместе с ним возникнет диссипация, которая происходит для ионов и электронов с разной эффективностью (в первую очередь из-за разности масс). Как следствие, между ними появляется разность температур. В этой ситуации равновесие оказывается невозможным, так как толщина атмосферы для частиц с разной температурой и массой неодинакова (простейшая грубая оценка – шкала высоты в формуле Больцмана). Вычисления Пономарева и соавторов, выполненные с учетом диссипации, дают потери солнечной массы до $2.5 \cdot 10^{20}$ г/год, что на три порядка больше, чем в моделях стационарной короны. Авторы связывали большую величину потока массы с высокой плотностью межпланетной среды, и подтверждали это оценками плотности плазмы в корональных выбросах массы, которая на орбите Земли может быть больше 1000 см^{-3} . Однако высокая скорость при более низкой плотности также согласуется с их оценками.

Яркая работа советских физиков осталась почти незамеченной за рубежом, а их первенство в вопросе негидростатической короны было установлено спустя годы. Независимо от них Паркер (E. Parker²) в 1958 году опубликовал пионерскую статью из трех частей. В первой он иным способом показал, что гидростатическое равновесие в короне невозможно. При известном в то время по оценкам Чэпмена (Chapman,

¹ Всехсвятский С.К., Никольский Г.М., Пономарев Е.А., Чередниченко В.И. К вопросу о корпускулярном излучении Солнца / *Астрономический Журнал*, 1955. Т. 22. С. 165–176.

² Parker E.N. Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields / *The Astrophysical Journal*, 1958. V. 128. P. 664–676.



Скорость солнечного ветра как функция гелиоцентрического расстояния при разных температурах короны в модели Parker 1958. Источник: Parker, *The Astrophysical Journal*, 1958. Адаптировано

1954) коэффициенте теплопроводности $\sim 5 \cdot 10^{-7} T^n \text{ эрг}/(\text{см}^2 \text{с} \cdot \text{°K})$, где $n = 5/2$ для ионизированного газа и $1/2$ для нейтрального газа, из баланса градиента теплового давления и силы тяжести следовало ненулевое давление газа на бесконечности. Причем оно оказалось столь велико, что его нельзя скомпенсировать давлением межзвездной среды или каким-то иным разумным способом.

Во второй части Паркер рассмотрел стационарное расширение солнечной короны. Высокоскоростной поток плазмы, связанный с этим расширением, мы сегодня называем солнечным ветром. Паркер решил уравнение Эйлера с учетом закона сохранения массы при политропическом уравнении состояния для одномерного изотропного течения плазмы. При этом он не учитывал ни наличие магнитного поля, ни вращение Солнца. Он получил, что солнечный ветер ускоряется за счет поддержания высокой температуры в короне и за счет того, что тепловое давление и сила тяжести по-разному зави-

сят от расстояния и их сумма зависит от радиуса r немонотонно. До критической точки течение является дозвуковым, плотность силы тяжести больше градиента давления, а после нее ситуация обратная, причем гравитация убывает быстрее, так что быстро расширяющийся газ продолжает ускоряться и становится сверхзвуковым. По оценкам Паркера, скорость корпускулярного потока на орбите Земли составляет 500 км/с при концентрации 500 см^{-3} . Величина скорости зависит от температуры в короне. Скорость быстро растет вблизи Солнца и становится практически константой на больших расстояниях. Заметим, что со времен Паркера, когда говорят о модели солнечного ветра, подразумевают описание ускорения солнечного ветра. То есть солнечный ветер – это в первую очередь скорость, а не магнитное поле, которое Паркер не учитывал во второй части модели. Концентрация оказалась по его оценкам сильно завышенной, но скорость отлично совпала с последующими измерениями. С концентрацией ситуация оказалась сложной, так как для правильного ее описания следует более точно понимать процессы разогрева короны и формирование слабого начального потока плазмы (Паркер полагал, что на поверхности Солнца скорость равна нулю).

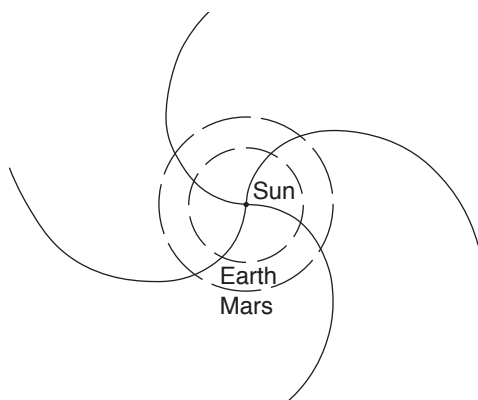
Перейдем к третьей части работы Паркера, посвященной моделированию межпланетного магнитного поля (ММП). Допустим, как предлагает Паркер, что мы находимся далеко от Солнца и уже разобрались, как солнечный ветер ускоряется. Пусть его скорость направлена радиально, уже достигла величины v и больше не меняется

с расстоянием. Пусть также магнитное поле направлено перпендикулярно скорости ветра. Тогда магнитное поле будет убывать по величине как $1/r^2$, а скорость ветра останется постоянной. Это и есть модель Паркера для межпланетного магнитного поля. В реальности ситуация сложнее, так как магнитное поле не всегда перпендикулярно скорости ветра, а скорость ветра может меняться с расстоянием. Однако модель Паркера дает хорошее приближение к реальности.

с удалением от звезды. Вспомним, что Солнце вращается. Тогда из-за неоднородного движения плазмы в солнечном магнитном поле возникает униполярный эффект, который создает электрическое поле в гелиосфере. Как известно, электрическое поле E при переходе в систему отсчета, движущуюся со скоростью $v \ll c$, преобразуется с точностью до членов v/c первого порядка малости: $E' = E + c^{-1}[v, B]$, где E' – электрическое поле в подвижной системе отсчета. Плазма вдали от Солнца отстаёт от его вращения, т. е. в силу закона сохранения момента импульса $M\omega r^2 = \text{const}$, где M – масса рассматриваемого элемента среды (является постоянной), $\omega \sim r^{-2}$ – угловая скорость плазмы, убывающая с расстоянием (иными словами, магнитное поле в гелиосфере недостаточно сильно, чтобы поддерживать коротацию с Солнцем). Таким образом, между слоями плазмы вблизи Солнца и на некотором удалении от него есть разность скоростей. На границе этих слоев возникнет разность потенциалов из-за различия E и E' , которая приведет к появлению тока. Здесь важно подчеркнуть отличие от известной школьной задачи о самолёте, летящем в магнитном поле Земли. Между его крыльями также будет разность потенциалов, но не будет тока, так как между ними нет разности скоростей (самолёт движется как целое, т. е. твердое тело). Возникновение могущей породить токи разности потенциалов из-за неоднородного движения вещества в магнитном поле – и есть униполярный эффект. В солнечном ветре также действует униполярный эффект. Так как плазма идеально проводящая, то в системе покоя элемента плазмы $E' = 0 = E + c^{-1}[v, B]$. Последнее – известное уравнение в замороженности, описывающее связь между электромагнитными полями и полем скорости в идеально проводящей плазме. Из него следует, что $|E| = v|B|/c$, поэтому можно не учитывать преобразование магнит-

ного поля при переходе между системами отсчета – поправки к нему будут всегда более высокого порядка, чем электрическому полю. Паркер предположил, что E вызвано вращением Солнца. Следовательно, если перейти в систему отсчета, где Солнце покоится, то в ней $E = 0$. Паркер предположил также, что магнитное поле вблизи Солнца ослабевает на расстоянии b , так что до этого расстояния плазма со-вращается с Солнцем (далее будем говорить «коротирует»), а после него – плазма не вращается вокруг оси нашей звезды. Из уравнения в замороженности получим $[v - \omega(r - b)\sin\theta \cdot e_\phi, B] = 0$, где e_ϕ – направляющий вектор вдоль азимутального направления, θ – полярный угол. Отсюда получаем, что поле скоростей $v - \omega(r - b)\sin\theta \cdot e_\phi$ параллельно магнитному полю. В данной системе отсчета скорость имеет постоянную радиальную компоненту v и при $r > b$ отрицательную азимутальную $-\omega(r - b)\sin\theta \cdot e_\phi$. Линии скорости имеют вид спиралей Архимеда $r/b - 1 - \ln(r/b) = v(\phi - \phi_0)/(b\omega)$, где v – скорость солнечного ветра вдоль данной спирали, а ϕ_0 – угол выхода спирали на Солнце. Магнитное поле будет закручено в точно такую же спираль, но в любой системе отсчета. Пользуясь

*Спираль магнитного поля. Ось вращения Солнца направлена на читателя. Солнце вращается против часовой стрелки.
Источник: Parker, The Astrophysical Journal, 1958*



параллельностью в данной системе отсчета скорости и ММП, Паркер получает решение уравнения Максвелла для магнитного поля $\text{div} \mathbf{B} = 0$:

$$\begin{aligned} B_r(r, \theta, \varphi) &= B_0(\theta, \varphi) b^2/r^2, \\ B_\theta(r, \theta, \varphi) &= 0, \\ B_\varphi(r, \theta, \varphi) &= \\ &= B_0(\theta, \varphi)(\omega/v)(r-b)(b^2/r^2) \sin\theta. \end{aligned}$$

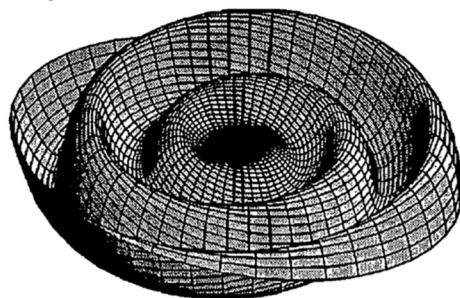
Обычно полученные решения используют при $B_0 = \text{const}$ при $\theta < \pi/2$, и $B_0 = -\text{const}$ при $\theta > \pi/2$. Это соответствует простейшему случаю дипольной гелиосферы – с двумя областями магнитного поля разного направления, что характерно для минимума солнечной активности (рис. 3). Паркер прекрасно понимал (и понимает) условность данного случая. Но общий успех его работы и удачное стечение обстоятельств привели к тому, что более сложные случаи долгое время почти не рассматривались. «Удачное стечение обстоятельств» – можно без всяких шуток говорить о влиянии солнечной активности на развитие научной мысли. А именно, большинство измерений космических аппаратов, которые позволяли последовательно проверить основные выводы Паркера о ММП, пришлось на середину 60-х гг., когда был минимум солнечной активности, и на вторую половину 70-х гг., когда тоже был минимум. В итоге дипольный случай оказался столь типичным, что иное почти не рассматривалось вплоть до полетов *Ulysses*. Причем не первого его витка вокруг Солнца, когда опять был минимум. При этом о недипольной структуре магнитного поля Солнца в годы максимумов было известно, но считалось, что недипольные гармоники быстро убывают с расстоянием и потому для изучения гелиосферы несущественны. Тем не менее коэффициенты $B_0(\theta, \varphi)$ в решениях Паркера позволяют учитывать гораздо более сложные поля

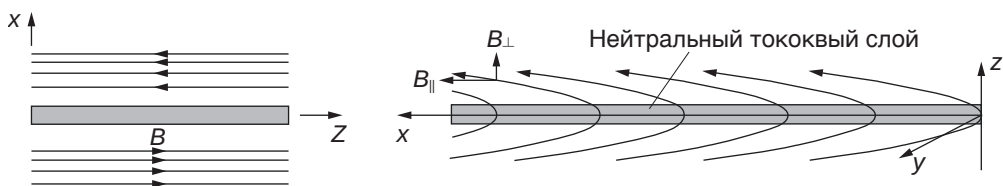
на Солнце и в межпланетной среде. Принципиальным их свойством в модели Паркера являются лишь 1) разделение радиальной и угловой зависимостей, т. е. вдоль каждого направления зависимость от радиуса одинакова, 2) специфический вид зависимости от r .

ЧТО ТАКОЕ ТОКОВЫЙ СЛОЙ?

Сосредоточим внимание на плоскости, разделяющей в простейшем варианте модели Паркера противоположные значения магнитного поля $B_0 = \pm \text{const}$ в разных полусферах. В гелиосферной плазме можно не учитывать ток смещения, поэтому $\text{rot} \mathbf{B} = 4\pi \mathbf{j}/c$, где j – плотность тока. Из-за резкого изменения B вдоль плоскости будет течь мощный ток в азимутальном и радиальном направлениях. Сформированный им токовый слой называют Гелиосферным Токовым Слой (ГТС). Поскольку долгое время рассматривалась дипольная структура гелиосферы, считалось, что он в гелиосфере – единственный, поэтому ГТС – это имя собственное, также как и окружающий его Гелиосферный Плазменный Слой (ГПС) – толстый

Гелиосферный токовый слой (ГТС) как плазменный диск со спиральными складками, повторяющими ход спирали Паркера.
Источник: Jokipii J.R., Thomas B.T. *Effects of drifts on the transport of cosmic rays, IV, Modulation by a wavy interplanetary current sheet* // *The Astrophysical Journal*, 1981. Vol. 243. P. 1115





Типичные примеры линий магнитного в токовых слоях, поперечные сечения. Стрелочками показаны направления магнитного поля и оси, серые прямоугольники – области, где магнитное поле меняет свое направление. Слева показан пример токового слоя без нормальной к нейтральной поверхности компоненты магнитного поля, справа – с ненулевой нормальной компонентой магнитного поля. Источник: Зелёный Л.М., Малова Х.В. Нейтральный токовый слой // Большая российская энциклопедия. Том 22. Москва, 2013. С. 308–309

слой плазмы и тока вокруг ГТС, в котором тепловое давление доминирует над магнитным давлением $B^2/8\pi$.

Что же такое токовый слой вообще? Токовый слой – это тонкий лист тока, возникающий в области резкого изменения магнитного поля в хорошо проводящей плазме. Частным случаем ТС является нейтральный слой. В нем магнитное поле не только резко меняет свою величину, но и направление. Иными словами, как минимум одна из компонент магнитного поля обращается в ноль и меняет знак. Поскольку в реальности, как в космической плазме, так и в лабораторных экспериментах, наблюдаются преимущественно нейтральные слои, то обычно под токовыми слоями подразумеваются слои с нейтральной поверхностью одной из компонент магнитного поля. Бывают токовые слои без нормальной компоненты магнитного поля и с нормальной компонентой магнитного поля.

В классической работе Харриса³ предложена одномерная кинетическая модель стационарного токового слоя в приближении бесстолкновительной плазмы основанная на системе уравнений Максвелла-Власова. Решения Харриса оказались относительно простыми:

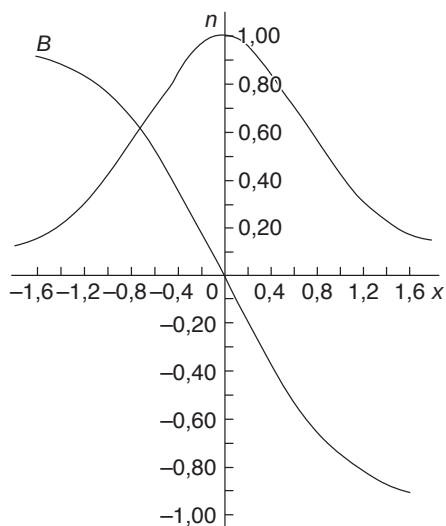
³ Harris E.G. On a plasma sheath separating regions of oppositely directed magnetic field // Nuovo Cimento, 1962. Vol. 23. Issue 1. P. 115.

Магнитное поле $B_x = B_0 \operatorname{th}(z/L)$, остальные компоненты равны 0;

Плотность тока вдоль направления y $j_y = \partial B_x / \partial z = B_0 / (L \cdot \operatorname{ch}^2(z/L))$, остальные компоненты равны 0;

Концентрация плазмы $n = n_0 / \operatorname{ch}^2(z/L)$, где $L = r_d c / v_d$ – толщина токового слоя, $r_d = (T / 4\pi n e^2)^{1/2}$ – дебаевский радиус, v_d – дрейфовая скорость, определяющая ток как $j = 2nev_d$, где коэффициент 2 возникает из-за сложения равных токов электронов и протонов.

Концентрация n и продольное магнитное поле B вдоль оси x в модели Харриса поперек токового слоя, все величины в безразмерной форме. Источник: Harris, Nuovo Cimento, 1962



$B_0^2 = 16\pi n_0 T$ – квадрат амплитуды магнитного поля, n_0 – заданная концентрация при $z = 0$.

В солнечном ветре B_r и B_ϕ меняют знак похожим образом, а концентрация в токовом слое максимальна, хотя пространственные масштабы иные, и не равны нулю остальные компоненты векторов. Несмотря на свою простоту, модель Харриса передает некоторые черты токовых слоев, в том числе ГТС и ГПС. Хотя она не может описать полностью даже токовый слой в модели Паркера (он как минимум двумерный).

В настоящее время токовым слоем Харриса иногда называют любое магнитное поле, плотность тока и концентрацию, напоминающие по форме решения Харриса, хотя в модели Харриса толщина токового слоя и амплитуда магнитного поля не произвольны и зависят от дебаевского радиуса, дрейфовой скорости и температуры.

ULYSSES ОТКРЫВАЕТ БЫСТРЫЙ И МЕДЛЕННЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

Модель Паркера дала нам ключ к пониманию солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП). Она в последующие 20–30 лет имела множество обобщений, которые сохраняли как минимум несколько ее следствий или способов применения:

- Солнечный ветер одинаков во всех направлениях;

- Гелиосфера дипольная – полярности отличаются только между полусферами, разделенными гелиосферным токовым слоем (ГТС);

- Зависимость от r для ММП одинакова для любого направления, B_θ либо мало, либо отсутствует, $B_r \sim 1/r^2$, $B_\phi \sim 1/r$;

- ММП закручено в спираль Архимеда с углом к радиальному направлению 45° на орбите Земли.

Проблема изучения гелиосферы в том, что большинство космических аппаратов летают вблизи плоскости эклиптики, которая расположена под углом 7° к плоскости экватора Солнца. То есть они не могут нам показать гелиосферу в 3D. С точки зрения изучения «чистого» солнечного ветра это также неудобно: вблизи экватора всегда расположен гелиосферный токовый слой, поэтому аппараты часто измеряют его ближайшее плазменное окружение. Последнее – одна из причин, почему люди стали уделять много внимания токовым слоям в гелиосфере.

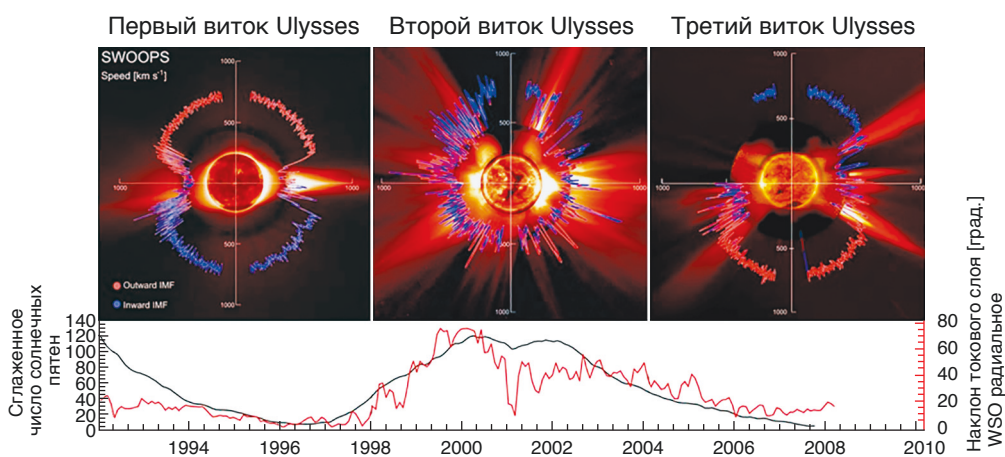
За всю историю человечества был всего один аппарат, который показал нам солнечный ветер вне плоскости эклиптики. Это *Ulysses* (Улисс), запущенный 6 октября 1990 г. За счет гравитационного маневра вблизи Юпитера в феврале 1992 г. он вышел из плоскости эклиптики и смог достичь полярных гелиоширот в 1994, 1995, 2000, 2001, 2007 и 2008 годах, находясь на расстоянии от 2 до 3.5 а.е. над полюсами. Подробному описанию достижений миссии *Ulysses* была посвящена замечательная статья И.С. Веселовского в № 5 «Земля и Вселенная» за 2009 г. «Завершение миссии АМС “Улисс”: четырехмерная гелиосфера». Несмотря на окончание миссии аппарата, его данные до сих пор обрабатываются, и внимательный исследователь может извлечь из них много нового и удивительного. Есть надежда, что в ближайшие десятилетия новые данные о гелиосфере и Солнце вдали от эклиптики сможет получить российский аппарат Интергелиозонд.

Одним из достижений *Ulysses*, находящихся в явном противоречии с моделью Паркера, является открытие быстрого и медленного солнечного ветра. На полюсах Солнца расположены корональные дыры с пониженной плотностью и температурой плазмы, из которых в полярную гелиосферу непрерывно вырываются потоки плазмы со

скоростью 600–700 км/с, в то время как на низких широтах типичная скорость 300–450 км/с. Условная граница между двумя типами ветра лежит на 450 км/с. При этом скорость солнечного ветра на низких и высоких широтах не является постоянной, она сильно зависит от широты и подвержена влиянию различных плазменных структур, таких как токовые слои. Она также сильно зависит от фазы солнечного цикла активности. В максимуме зависимость скорости от широты становится нерегулярной и еще более неоднородной, чем в минимуме. При этом в максимуме ни в одном из полушарий нет доминирующей полярности – она постоянно чередуется. В минимуме полярность также чередуется, но только на низких широтах из-за относительного движения токового слоя ГТС и аппарата, а также по причине слоистости ГТС, о которой мы еще поговорим.

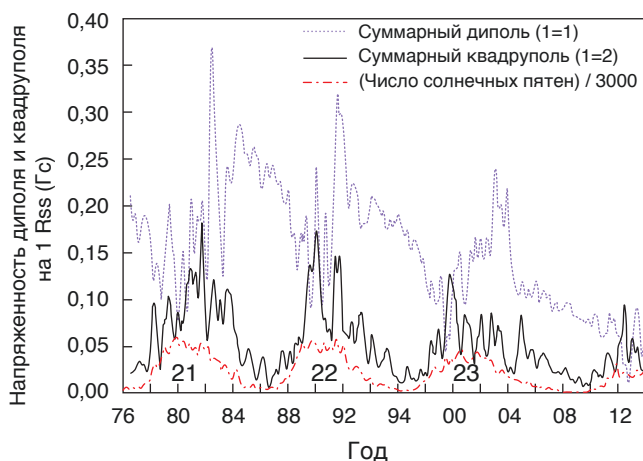
ГЕЛИОСФЕРНЫЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ НЕ ОДИНОК, ГЕЛИОСФЕРА НЕ ВСЕГДА ДИПОЛЬНАЯ

Почему происходят столь сложные вариации полярности в максимуме активности? Причина – в изменениях магнитного поля Солнца на протяжении цикла. Если в минимуме магнитное поле нашей звезды напоминает диполь, ось симметрии которого на несколько градусов отклонена от оси вращения, то в максимуме все гораздо сложнее. Магнитное поле Солнца можно представить как сумму двух диполей, один направлен вдоль оси вращения, а другой ей перпендикулярен, а также мультипольных гармоник, как осевых, так и наклонных. Наклонные гармоники в максимуме больше осевых (в минимуме осевые доминируют), недипольные гармоники

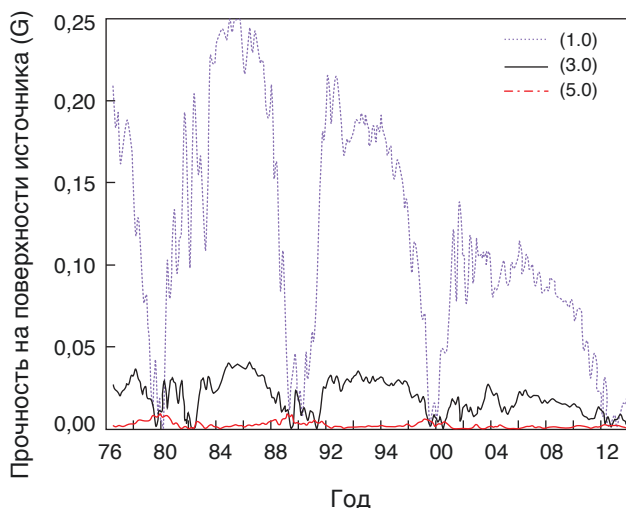


Скорость солнечного ветра и полярность магнитного поля по измерениям Ulysses за время первого, второго и третьего витков вокруг Солнца (сверху). На графиках длина вектора каждой точки графика соответствует величине скорости. Синим и красными цветами показаны соответственно отрицательная и положительная полярности радиальной компоненты ММП. Фоны – иллюстрации на основе фотографий Солнца в соответствующие периоды. Снизу график числа солнечных пятен (черный), левая ось, максимум пятен соответствует максимуму солнечной активности. Красным внизу показано отклонение ГТС от экватора (правая ось). Данные о ГТС на высоких широтах следует воспринимать с осторожностью – природа найденных токовых слоев достойна обсуждения.

Источник: <https://sci.esa.int/web/ulysses/-/43461-polar-plots-of-the-solar-wind-speed>



Вариации магнитного поля Солнца на расстоянии 2 радиусов (source surface, R_{ss}) в 1976–2013 гг., единицы измерения – Гауссы. Синим пунктиром показан вклад диполя в общее магнитное поле, черная кривая – вклад квадруполь. Красным пунктиром показано поделенное на 3000 число солнечных пятен, 21, 22, 23 – номер цикла активности. Источник: Wang Y.-M. Solar cycle variation of the Sun's low-order magnetic multipoles: heliospheric consequences // Space Science Reviews, 2014. Vol. 186 (1–4). Pp. 387–407. DOI: 10.1007/s11214-014-0051-9



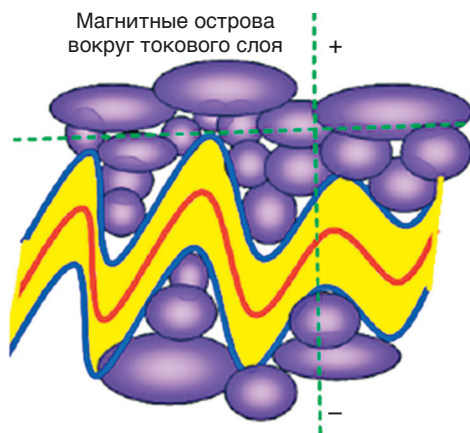
То же самое, что и на рисунке 7, для осесимметричных дипольной (1,0), октупольной (3,0) и пятой (5,0) гармоник. Заметно, что в периоды максимумов активности (максимальное число пятен) диполь не доминирует. Источник: Wang Y.-M. Solar cycle variation of the Sun's low-order magnetic multipoles: heliospheric consequences // Space Science Reviews, 2014. Vol. 186 (1–4). Pp. 387–407. DOI: 10.1007/s11214-014-0051-9

могут превышать дипольные по вкладу в магнитное поле на поверхности звезды. При этом величина вкладов гармоник разных типов по-разному зависит от времени, а длительность цикла для каждой из них может отличаться. Сумма всех гармоник может давать магнитное поле с несколькими областями различной полярности, разделенных нейтральными линиями B_r . Их количество и форма может на временах порядка нескольких лет полностью поменяться.

Таким образом, естественно предположить, что если на Солнце есть нейтральные линии B_r , то они будут вытягиваться в гелиосферу. Как мы обсуждали, токовые слои часто формируются вблизи нейтральных линий. Например, гелиосферный токовый слой – продолжение приэкваториальной нейтральной линии Солнца. Можно ожидать, что в гелиосфере в максимуме солнечной активности у ГТС может быть много братьев. Но из-за исторически сложившихся представлений

такую возможность почти не рассматривали. Кроме того, аппараты «видят» ГТС вблизи экватора даже в периоды максимума каждые 27/2 дней (где 27 – средний период обращения Солнца и его магнитного поля вокруг своей оси). Если «ГТС» при этом видно по данным *Ulysses* на высоких гелиоширотах, то токовый слой должен был бы сильно изогнуться, чтобы находиться и вблизи эклиптики рядом с орбитой Земли, и одновременно практически над Солнцем. Это маловероятно, так как токовые слои склонны вытягиваться вдоль направления скорости, а при сильном изгибе образуется складка, которую солнечному ветру придется обходить, или «взбираться в гору». Кроме того, любой токовый слой может разорваться на вереницу магнитных островов. А без подпитки потоками солнечного ветра он не восстановится.

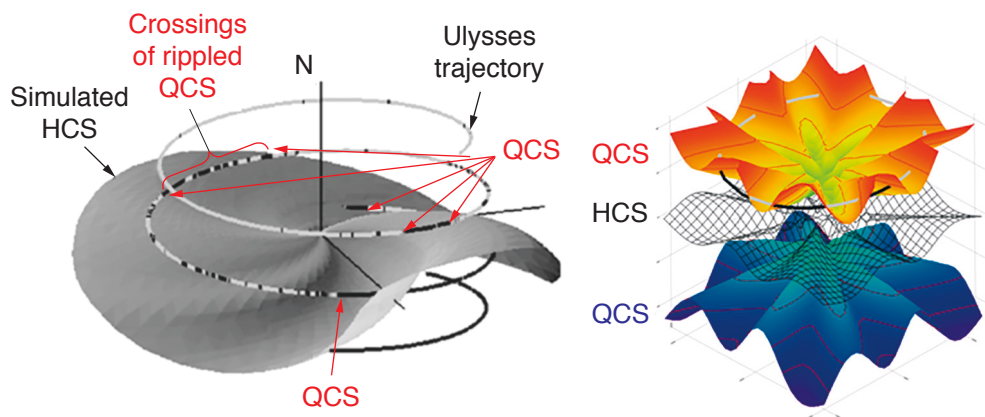
Гелиосферный токовый слой представляет собой слегка возмущенный токовый диск вблизи экватора. По меткому выражению нобелевского лауреата Альфвена (H. Alfven), он напоминает юбку балерины. Характерный угловой размер складочек на юбке – в пределах 10 градусов. Микич (Z. Mikić) с соавторами в 1999 году на основе анализа данных *Ulysses* построили модель, в которой учитывали только дипольную гармонику магнитного поля Солнца. Несмотря на то что они изобразили траекторию *Ulysses*, нанесли на нее знак основной компоненты магнитного поля и увидели крупные области изменения полярности далеко от экватора, они не отказались от дипольной гелиосферы с одним токовым слоем на экваторе. Чередование полярности происходит в десятках градусов широты от экватора, на расстоянии от него более 1 а.е. Размер областей знакопостоянного магнитного поля велик – аппарат их пересекает многие дни и/или недели. Поэтому области измененной поляр-



Складчатый токовый слой, окруженный магнитными островами. Красная линия – нейтральная поверхность токового слоя, желтая область – токовый слой и его плазменное окружение, фиолетовые пузыри – магнитные острова (magnetic islands). Острова образуются из-за разного рода неустойчивостей, но солнечный ветер постоянно восстанавливает разрушающийся токовый слой. Типичный размер волновых возмущений в ГТС – не более 100. Источник: Khabarova, Malandraki, Malova, Kislov, Greco et al. Current sheets, plasmoids and flux ropes in the heliosphere. Part I. 2-D or not 2-D? General and observational aspects. Space Science Reviews. 2021. Vol. 217, Issue 3, DOI: 10.1007/s11214-021-00814-x (рисунок адаптирован)

ности нельзя списать на какие-либо флуктуации и кратковременные изменения на Солнце. Их можно объяснить пересечением складок крупномасштабных токовых слоев, расположенных на высоких широтах. То есть при пересечении аппаратом токового слоя на высоких широтах мы можем видеть не ГТС, а другой токовый слой, похожий на него, но высокоширотный.

Дополнительные токовые слои меняются на протяжении солнечного цикла активности. Если всего максимальное число слоев вместе с ГТС 2, 4 или любое другое четное число, дополнительные слои рождаются по мере роста

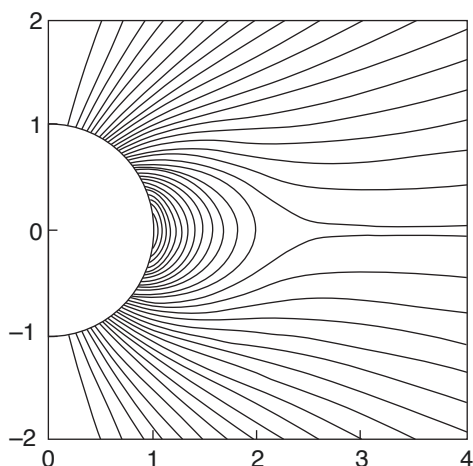


Токовые слои в солнечном ветре. а – Гелиосферный токовый слой (ГТС, HCS) в модели Микича с соавторами (Z. Mikić) 1999 г. Спираль – траектория аппарата Ulysses во вращающейся вместе с Солнце системе отсчёта. Серым и черным цветами на ней отмечены магнитные поля разного знака. Типичное расстояние от большинства из областей чередования знака до ГТС – десятки градусов широты и несколько астрономических единиц. Аппарат пересекает эти области за дни-недели. Их можно интерпретировать как возмущенные квазистационарные токовые слои (quasi-stationary current sheets, QCS). б – Квазистационарные токовые слои по результатам моделирования Кислова и соавторов (Kislov et al.) в 2019 г.: синий – южный QCS, красный – северный QCS, вблизи экватора – возмущенный ГТС. Кольцо с серыми и черными цветами показывает изменение полярности при движении поперек складок одного из токовых слоев. Вблизи оси вращения использованная модель неприменима. Источник: Maiewski E.V., Kislov R.A., Khabarova O.V., Malova H.V., Popov V. Yu., Petrukovich A.A., Zelenyi L.M. Magnetohydrodynamic modeling of the solar wind key parameters and current sheets in the heliosphere: radial and solar cycle evolution // *The Astrophysical Journal*, 2020. Vol. 892. Issue 1. P. 12. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab712c>

недипольных гармоник магнитного поля над одним из полюсов, затем движутся в сторону экватора. Поочередно принимают на себя роль ГТС как экваториального токового слоя. Продолжая движение во второй части цикла, они достигают высоких широт над противоположным полюсом, где исчезают. Для нечетных гармоник, когда общее число слоев не может превышать 3, 5 или большее нечетное число, дополнительные слои рождаются вблизи ГТС на экваторе, движутся симметрично относительно него и в конце концов исчезают на полюсах. Если вблизи Солнца выживают гармоники разной четности, ситуация может быть сколь угодно сложной.

Оговорка про «выживание» токовых слоев принципиальна. Вообще говоря,

мультипольное магнитное поле убывает с расстоянием быстрее дипольного. Если дипольное магнитное поле уменьшается без учета угловых зависимостей, по закону $1/r^3$, то квадрупольное спадает как $1/r^4$, а октупольное – как $1/r^5$. Кажется бы, в гелиосфере недипольные составляющие ММП неважны. Однако за счет высокой проводимости магнитное поле «вморожено» в плазму и увлекается течением солнечного ветра. В частности из-за этого в модели Паркера закон спада B_r есть $1/r^2$ и не равно нулю B_ϕ . Кроме того в плазме есть токи, которые искажают магнитные поля. Простое разложение магнитного поля по гармоникам не учитывает токи. При более точном моделировании, если недипольная гармоника



Линии магнитного поля вблизи Солнца в рамках модели Пноймана и Коппа 1971 года, меридиональное сечение. По осям – координаты в радиусах Солнца. На 2 радиусах расположена альфвеновская поверхность, после которой линии магнитного поля становятся радиальными. Вблизи экватора виден переход от замкнутых линий к открытым. Источник: Pnevman G.W., Kopp R.A. Gas-magnetic field interactions in the solar corona // Solar Physics, 1971. Vol. 18. Issue 2. P. 258

магнитного поля не убывала до определенной границы, то дальше потоки солнечного ветра ее выносят за счет вращенности. Сама граница приближенно соответствует альфвеновской поверхности. То есть такой поверхности, где локальная скорость плазмы равна альфвеновской скорости $v_A = B/(4\pi\rho)^{1/2}$, где ρ – плотность вещества. После пересечения альфвеновской поверхности магнитное поле становится слишком слабым, чтобы существенно исказить течение солнечного ветра. Под действием потока плазмы оно вытягивается радиально и поддерживается возникающими из-за этого токами. Также вблизи альфвеновской поверхности нарушается одинаковость угловой скорости плазмы вдоль линий магнитного поля – магнитному полю

«не хватает сил» его поддерживать («нарушение коротации»). Расположена альфвеновская поверхность по разным оценкам на 5–20 радиусах Солнца (1 радиус Солнца $\approx 7 \cdot 10^{10}$ см).

ЗАМКНУТЫЕ ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВДАЛИ ОТ СОЛНЦА И МАГНИТНЫЕ СЕПАРАТРИСЫ

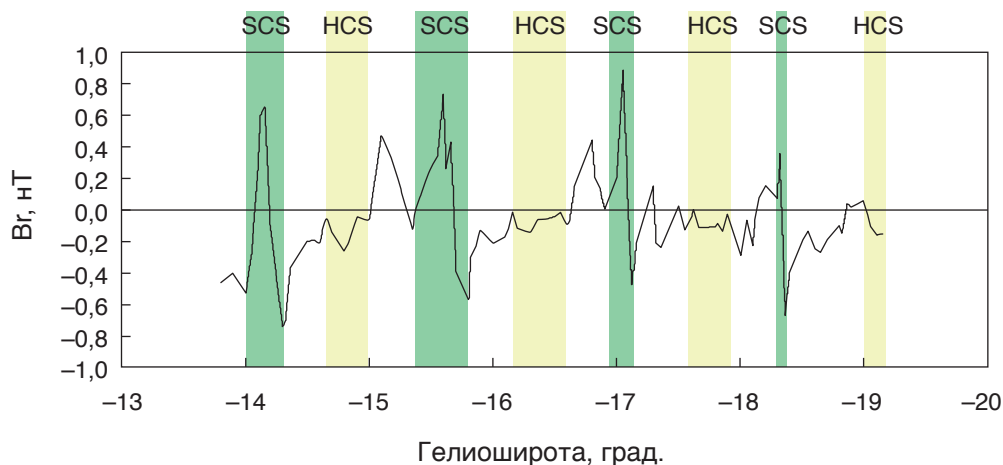
Альфвеновская поверхность – место, где предположительно начинается гелиосферный токовый слой. Считается, что примерно до альфвеновской поверхности расположена большая часть замкнутых линий магнитного поля. А те линии, которые до нее дотянулись, разрываются потоком ускоряющегося солнечного ветра и становятся такими же радиальными, как и скорость (не считая паркеровское азимутальное магнитное поле, вызванное вращением звезды). Такие линии магнитного поля часто называются открытыми, хотя в силу фундаментального условия $\text{div} B = 0$ они все же замыкаются, но далеко от Солнца – в межпланетном пространстве, либо вблизи границ гелиосферы.

Согласно модели Пноймана и Коппа 1971 г. (Pnevman G.W., Kopp R.A.), ГТС расположен между открытыми линиями, а вблизи Солнца ток, вытекающий из одного полушария, по силовой линии приходит в противоположное, не вытягиваясь по радиусу. Что касается азимутального (кольцевого) тока, то он мал вблизи Солнца из-за коротации плазмы и похожести магнитного поля на дипольное. При изменении геометрии силовых линий он резко усиливается. Заметим, что если хотя бы одна поверхность, образованная вращением линии магнитного поля вдали от Солнца замкнется, то замкнутся и те, которые находятся внутри нее ближе к звезде,

иначе они пересекутся. Поэтому в гелиосфере везде, где есть ГТС, часть линий магнитного поля его пересекает. Конечно, в случае сильной спутанности линий магнитного поля магнитные поверхности могут не существовать. Кроме того, часть силовых линий может в реальности закручиваться вокруг остальных, образуя жгуты и токовые нити. Последние действительно наблюдаются. Главное, что некоторая часть линий магнитного поля может пересекать экватор. Сейчас вопрос о замкнутых линиях еще не решен окончательно. Он важен, так как по ним частицы из высоких широт Солнца могут достигать низкоширотной гелиосферы, где расположена Земля. Такие частицы давно известны, в частности о них писал в своих учебниках по солнечному ветру маститый американский физик Хундхаузен (Hundhausen) в 1970-е гг. Позже была построена ставшая в последствии авторитетной модель Фиска 1996 г. (L.A. Fisk). Она описывала, как из-за неоднородного вращения плаз-

мы на Солнце часть линий магнитного поля опускается на низкие широты. Суть модели Фиска проста – если линия магнитного поля имеет вид наклоненной к оси вращения Солнца буквы С, то из-за неоднородного вращения плазмы в основании линии она может перевернуться и достичь низких широт.

Так или иначе, ГТС скорее всего расположен на замкнутых силовых линиях, более вытянутых, чем вблизи Солнца. Область, где силовые линии ММП как будто начинают замыкаться, соответствует гелиосферному плазменному слою (ГПС). Поскольку выше всегда расположены открытые линии из полярных областей Солнца, которые могут дотянуться даже до границ гелиосферы, он отделен от окружающего солнечного ветра магнитными сепаратрисами, т. е. силовыми линиями, пограничными между открытыми и замкнутыми. В магнитосферах планет, в частности Юпитера и Земли, аналоги таких линий известны. Обычно на них протекают мощные токи из-за того, что области, разделяемые



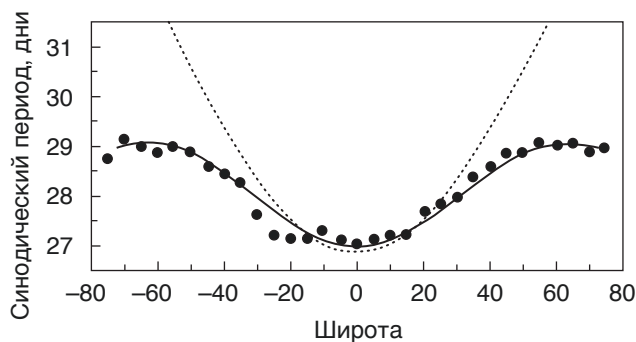
Радиальная компонента магнитного поля по данным Ulysses как функция широты. Измерения сделаны в апогелии, когда аппарат пересекал ГТС и ГПС практически перпендикулярно на расстоянии 5.3. а.е. от Солнца. SCS – сепаратрисные токовые слои, HCS – плазменное окружение одной из копий ГТС. Источник: Kislov R.A., Khabarova O.V., Malova H.V. A new stationary analytical model of the heliospheric current sheet and the plasma sheet // Journal of Geophysical Research, 2015. Vol. 120. Issue 10. Pp. 8210–8228. DOI: 10.1002/2015JA021294

сепаратрисами, оказываются между собой слабо связанными. В идеализированных моделях между ними может даже не быть обмена веществом. На самом деле он всегда есть, как минимум из-за магнитной диффузии. Сепаратрисные токи нужны для того, чтобы удерживать от распада систему в целом.

Сепаратрисные токовые слои были найдены в 2015 г., по данным *Ulysses*, при пересечении ГТС в апогелии на расстоянии 5.3 а.е., когда аппарат двигался практически перпендикулярно слою. При этом оказалось, что токовая система устроена гораздо сложнее, чем можно было ожидать. Она оказалась слоистой. Еще раньше было известно, что ГТС сам по себе бывает слоистый. Но здесь речь идет о больших масштабах. Толщина ГТС – тысячи – десятки тысяч км, в рассмотренном случае речь идет о миллионах км, это масштаб ГПС. Обнаруженная слоистость не связана с покачиванием токового слоя, в случае покачивания графики магнитного поля были бы симметричны относительно разграничивающих соседние зоны вертикальных линий. Однако измеренное магнитное поле больше напоминает периодическую функцию, похожую на тангенс. Это выглядит как своеобразный бутерброд из толстых токовых слоев, а расположенные на краю всей системы нейтральные поверхности соответствуют сепаратрисам. Примечательно, что обнаруженная слоистость никак не связана с существованием крупномасштабных токовых слоев, вызванных недипольным магнитным полем на Солнце. Каждый из дополнительных крупномасштабных слоев может иметь подобную структуру, если рассмотреть его с большим разрешением. Точная природа слоистости не известна, но для токовых слоев характерна фрактальная структура из-за влияния турбулентности и копирование структуры из-за процессов самоорганизации.

МЕЖПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ВОЗМОЖНОСТЬ НЕПАРКЕРОВСКОЙ СПИРАЛИ

Из-за влияния токового слоя магнитное поле может зависеть от расстояния слабее, чем в модели Паркера. Случай, когда $B_r \sim r^{-2}$, соответствует простому сохранению магнитного потока в ситуации однородного магнитного поля, как бы склеенного из двух монополей, $B_r r^2 = \text{const}$ и является следствием сферически-симметричного разлета вещества. По большому счету, r^2 – зависимость от радиуса элемента площади поверхности в течении со сферической геометрией. При растекании плазмы от цилиндрического источника была бы зависимость вида $B_r r = \text{const}$, так как площадь цилиндра пропорциональна радиусу в первой степени. Вблизи токового слоя, из-за вытягивания линий магнитного поля вдоль него, течение может быть ближе к цилиндрическому разлету плазмы, чем к сферическому. Эффект был обнаружен еще в работе Бурлаги и соавторов 1982 г. (L.F. Burlaga). Однако в те годы ученых все еще интересовало, можно ли с помощью модели Паркера описывать солнечный ветер точно. Бурлага и соавторы сделали заключение: $B_r \sim r^{-1.56}$, $-1.56 \approx -2$, поэтому B_r согласуется с моделью Паркера. Однако вывод Бурлаги неточен. Стоит заметить, что, если по данному закону ($B_r \sim r^{-1.56}$) попробовать пересчитать магнитное поле с поверхности Солнца на орбиту Земли, разница с оценкой по модели Паркера (закон $B_r \sim r^{-2}$) будет более чем на порядок. Лишь в последние годы эффекту превышения магнитного потока стало уделяться более пристальное внимание, в том числе благодаря усилиям российских ученых О.В. Хабаровой и В.Н. Обридко (работы 2012, 2013 гг.). Постепенно стало



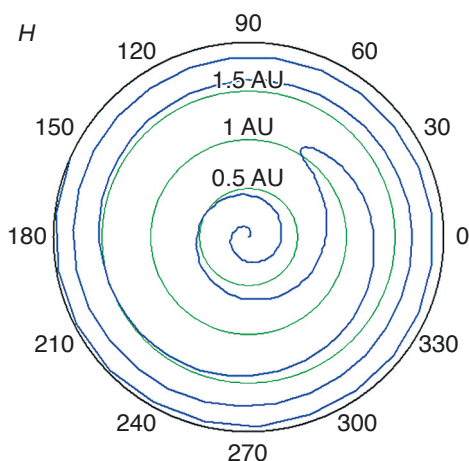
Пунктиром показан период обращения фотосферы на разных широтах. Черными точками и проведенной по ним сплошной линией показан период обращения короны (видимой в зеленой линии 530.4 нм, Fe XIV). Источник: Badalyan O.G. *New Astronomy*. Vol. 15. Issue 1. P. 135–143

понятно, что магнитное поле не только может зависеть от r неквадратично. Вдоль различных направлений показатель степени может быть разным.

В модели Паркера спираль ММП получается естественным образом как следствие вращения Солнца и нарушения коротации в гелиосфере. Однако при определенных условиях в солнечном ветре может возникнуть и непаркеровская спираль. Между фотосферой и короной есть зависящая от широты разность угловых скоростей. Как следствие, униполярный эффект приводит к пропорциональной разности угловых скоростей разности потенциалов между короной и фотосферой. Из-за разности потенциалов потечет ток. Этот ток будет иметь касательную к фото-

сфере составляющую, ответственную за создание азимутального магнитного поля. Удивительно, но разность скоростей фотосферы и короны не только зависит от широты, но является знакопеременной.

Значит, должна быть широта, на которой разность потенциалов, поверхностный ток и азимутальное магнитное поле меняют знак. Так как линии межпланетного магнитного поля эквипотенциальны, между фотосферой и плазмой солнечного ветра тоже должна быть знакопеременная разность потенциалов. Там, где разность потенциалов знакопеременна, составляющие плотности тока вдоль силовых линий магнитного поля меняют направление. Как следствие закона Максвелла-Ампера о циркуляции, в той же области произойдет изменение знака азимутального магнитного поля. А это означает изменение направления закручивания спирали магнитного поля. Пока что его



Спираль магнитного поля в модели, учитывающей знакопеременную разность скоростей между фотосферой и короной. Источник: Kislov R.A., Khabarova O.V., Malova H.V. *A new stationary analytical model of the heliospheric current sheet and the plasma sheet* // *Journal of Geophysical Research*, 2015. Vol. 120. Issue 10. Pp. 8210–8228. DOI: 10.1002/2015JA021294

не обнаружили в наблюдательных данных, однако, даже если это не удастся, нельзя исключить его наличие у других звезд.

В области, где направление тока в ГТС меняется, осесимметричный плоский токовый слой может быть неустойчив, и на нем может образоваться кольцообразная складка. Применительно к ГТС это будет означать появление магнитной стенки. Если в реальности такая магнитная стенка существует, то в наблюдениях она будет выглядеть как препятствие для распространения солнечных энергичных частиц. Интересно, что наблюдаемое поведение ионов кислорода и железа солнечного происхождения вблизи орбиты Марса не может быть объяснено без привлечения идеи о существовании магнитной стенки, как показывали в 2002 г. Римс и Нг (Reames, Ng 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Солнечный ветер, межпланетное магнитное поле и токовые слои могут быть устроены гораздо сложнее, чем можно было предположить полвека назад. Неоценимый вклад в развитие наших представлений о гелиосфере внес аппарат *Ulysses*, единственный аппарат, исследовавший ее полярные области. Многие еще остаются неясным. Например, еще только предстоит выяснить точные причины слоистости гелиосферного токового и плазменного слоев, подтвердить или опровергнуть существование непаркеровской спирали межпланетного магнитного поля, проследить динамику крупномасштабных токовых слоев на протяжении солнечного цикла активности. Эти и многие другие задачи ждут своего решения.



**А вы отправили
обязательный
экземпляр?**

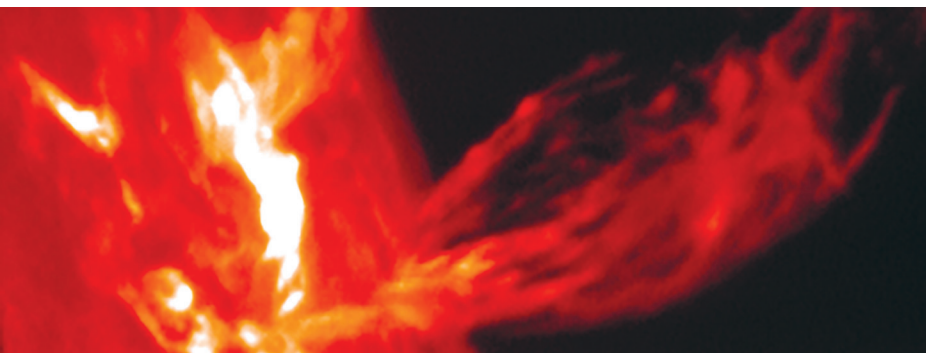
Издательство «Наука» предлагает организациям
и независимым издателям услугу по отправке
Обязательного Электронного Экземпляра
в Российскую государственную библиотеку
и Российскую книжную палату

При размещении научных, научно-популярных книг и журналов в Электронной библиотечной системе
Издательства «Наука» (libnauka.ru) данную услугу мы предоставляем бесплатно

Задать вопрос и узнать о стоимости услуги вы можете по адресу cee@naukaran.com

Реклама

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ



ТАРАСОВ Николай Тимофеевич,

кандидат физико-математических наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

DOI: 10.7868/50044394822010042

ВВЕДЕНИЕ

Еще в 1853 г. всемирно известный астроном Рудольф Вольф предположил, что повышение солнечной активности (СА) может влиять на сейсмичность Земли. Более широкие исследования влияния процессов, протекающих на Солнце и в околоземном пространстве на состояние земной коры и сейсмичность, начались 50–60 лет назад, когда развитие инструментальных наблюдений на Земле и в околоземном пространстве позволило получать большие объемы данных, необходимых для таких исследований. За прошедшие годы этой теме был посвящен целый ряд работ, выполненных как в России (СССР), так и за рубежом.

Такой интерес вызван тем, что новые результаты, полученные в этом направлении, могут помочь более точно предсказывать периоды повышения сейсмической опасности на Земле, изучить воз-

действие на сейсмичность факторов разной физической природы и более полно понять закономерности солнечно-земных связей. Однако опубликованные результаты нередко носят противоречивый характер. Дискуссионными остаются также вопросы о первопричине и физическом механизме влияния СА на сейсмичность Земли. Поэтому требуются дальнейшие исследования. В предлагаемой работе представлены новые результаты, полученные автором при исследовании влияния на сейсмичность Земли магнитных бурь (МБ) и других факторов, связанных с повышением СА.

МЕТОДИКА

С этой целью изучены и сопоставлены с вариациями СА изменения глобальной сейсмичности Земли с 1973 по 2001 г. Такой выбор временного интервала был обусловлен наличием пред-

Изображение на заставке: Солнечный протуберанец (источник: U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration - <https://web.archive.org/web/20141024201229/http://www.swpc.noaa.gov/primer/primer.html>)

ставительных данных о сейсмичности и ряда параметров, характеризующих СА. В качестве исходного материала для анализа сейсмичности использовался каталог глобальной сейсмичности NEIC. Он содержит дату-время, координаты и глубину очага, а также M_S магнитуду, которой принято характеризовать энергию землетрясений, для 320-ти тысяч землетрясений, произошедших на Земле за рассматриваемый период. Представительными являются землетрясения с $M_S > 4.4$, которых оказалось более 130 тысяч. Для анализа СА использовались данные ИСЗ IMP-8, орбита которого располагалась за пределами магнитосферы Земли, и геостационарных ИСЗ серии GOES, а также данные наземных наблюдений и каталоги геомагнитных бурь.

На первом этапе было изучено изменение сейсмичности после геомагнитных бурь (всего за рассматриваемое время их было зафиксировано 1071). Используемые для этой цели экспериментальные данные иллюстрирует пример, приведенный на рис. 1. На нем представлено изменение ежесуточного числа землетрясений за четырехмесячный период времени, в пределах которого наблюдались несколько сильных и ряд более слабых магнитных бурь с внезапным началом, характерная форма которых хорошо видна на графике возмущенной компоненты геомагнитного поля (рис. 1, а). Однако каких-либо заметных изменений сейсмичности (рис. 1, б) после МБ выделить здесь не удастся. Возможно, это связано с тем, что вызванные изменения настолько малы, что обнаружить их на фоне естественных вариаций сейсмичности не представляется возможным.

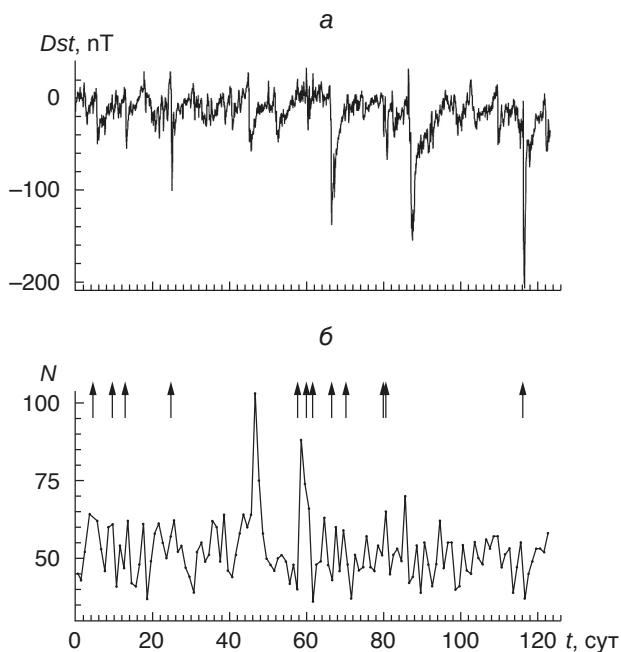


Рис. 1. Примеры изменения во времени геомагнитного индекса Dst (а) и ежесуточного количества землетрясений (б), зафиксированных в Каталоге глобальной сейсмичности NEIC. Стрелками показаны времена возникновения магнитных бурь с внезапным началом, взятые из каталога NOAA

Поэтому для выделения вызванных изменений сейсмичности на фоне ее естественных вариаций применялась методика наложения эпох. Сейсмичность рассматривалась в пределах временных окон шириной ± 30 сут от начала каждой из бурь, которые затем совмещались во времени. В качестве реперов для выбора таких окон использовались времена начала каждой из геомагнитных бурь. Дата и время всех землетрясений, возникших в пределах таких окон, заменялось на время, пересчитанное относительно момента начала соответствующей бури, а по их магнитудам M_S с помощью известного соотношения:

$$\lg E = 1.5 \cdot M_S + 4.8 \quad (1)$$

вычислялась его энергия в джоулях, после чего все они объединялись в общий подкаталог.

Далее временное окно разбивалось на короткие последовательные интервалы, и по полученному подкаталогу подсчитывались суммарная сейсмическая энергия и число землетрясений, возникших в пределах каждого из них, а также вычислялись средняя энергия этих землетрясений и время, соответствующее середине каждого из таких интервалов, отсчитываемое от момента начала МБ. Затем строились зависимости количества землетрясений и их средней энергии от времени и оценивались средние значения этих величин за все время перед магнитными бурями (уровень фона) и их средние значения после начала МБ. Определялась также суммарная сейсмическая энергия (СЭ) всех землетрясений, произошедших до и после МБ. Для оценки статистической значимости из-

менения среднего количества землетрясений и их энергии после магнитных бурь использовался непараметрический критерий Вилкоксона–Манна–Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительно работоспособность такой методики была проверена на примере возмущенной компоненты геомагнитного поля, форма которой хорошо известна (см. рис. 1). С этой целью при вычислениях вместо энергии землетрясений использовались значения Dst-индекса. Полученная при этом «осредненная» магнитная буря представлена на рис. 2. На нем хорошо видны все ее характерные детали: рез-

кое возрастание напряженности поля во внезапном начале, которое точно совпадает по времени с МБ, взятом из каталога, основная фаза бури, когда напряженность сильно уменьшается, и фаза восстановления, в течение которой происходит постепенное возвращение поля к уровню фона. Все это убеждает в том, что методика пригодна для решения поставленной задачи.

Сначала с ее помощью было изучено изменение количества землетрясений. На рис. 3 представлены осредненные по 1071 МБ зависимости ежесуточного количества землетрясений от времени в пределах временных окон ± 30 сут от начала магнитных бурь, полученные как по землетрясениям только представительных магнитуд, так и по всем сейсмическим событиям, представленным в каталоге. Из него следует, что в первые 5 сут после МБ происходит заметное уменьшение количества землетря-

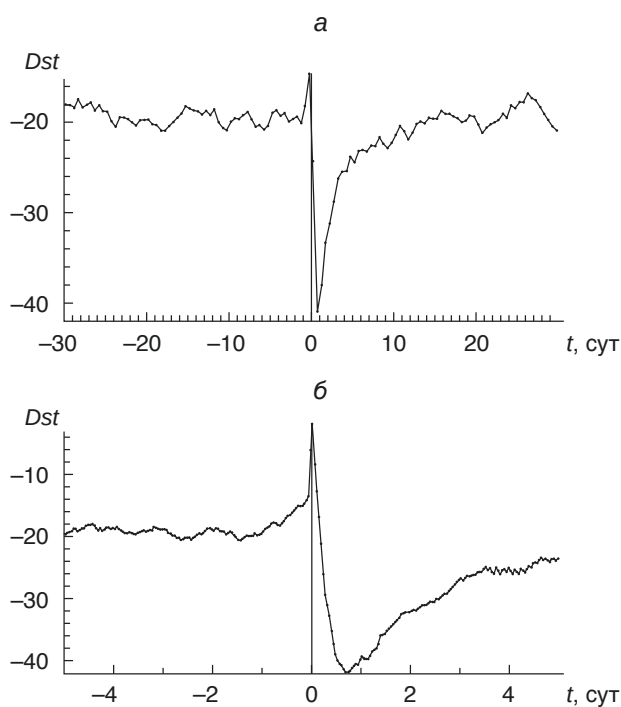


Рис. 2. Изменение геомагнитного индекса Dst в пределах ± 30 сут от начала магнитных бурь (вертикальная линия), полученное методом наложения эпох (а) и аналогичная зависимость, построенная во временном окне ± 5 сут с более высоким разрешением по времени (б)

сений, а через 5–6 сут их число вновь возрастает, оставаясь при этом ниже уровня фона. Неожиданным является то, что отмеченное понижение сейсмичности началось как минимум за 2–3 сут до начала магнитных бурь. Более детальный анализ показывает, что уменьшение количества землетрясений начинается за 3–5 сут до МБ (см. рис. 1, в). Следовательно, на этом временном интервале магнитные бури не могли быть его причиной.

Геомагнитные бури возникают на Земле через несколько суток после вспышек или корональных выбросов масс, что обусловлено относительно невысокой скоростью распространения солнечной плазмы. Однако электромагнитное излучение Солнца (ЭИС) достигает Земли всего за 8.2 мин, что позволяет предположить, что именно оно и является причиной изменения сейсмичности в этом интервале времени. По данным спутника IMP-8, скорость фронта солнечной плазмы на границе магнитосферы Земли во время возникновения рассматриваемых магнитных бурь лежала в пределах 309–1040 км/с. Откуда следует, что время запаздывания МБ относительно всплеска ЭИС должно лежать в пределах 1.6–5.6 сут. Это хорошо согласуется со временем опережения начала спада сейсмичности относительно МБ, что в какой-то мере подтверждает высказанное предположение.

Для проверки этой гипотезы на том же статистическом материале было рассмотрено изменение глобальной сейсмичности до и после солнечных событий, которые послужили причиной

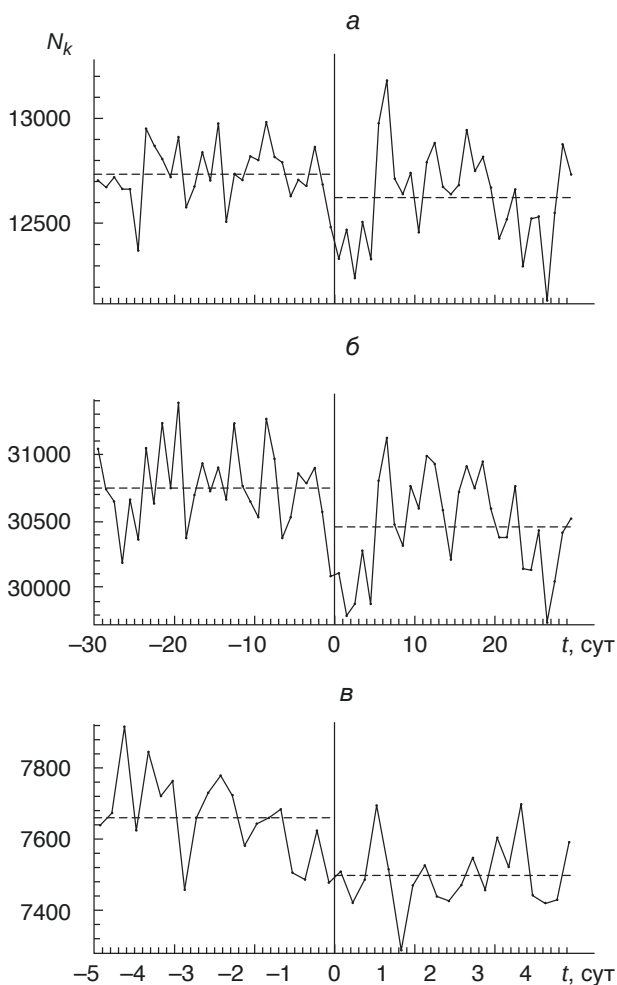


Рис. 3. Изменение во времени количества землетрясений в интервале ± 30 сут до и после магнитных бурь с внезапным началом. а – Землетрясения представительных магнитуд ($M_s > 4.4$), б – все землетрясения, представленные в каталоге NEIC, и фрагмент этой зависимости длительностью ± 5 сут, построенный с более высоким разрешением по времени (в). Вертикальной линией отмечено время начала магнитных бурь, горизонтальным пунктиром показаны средние значения числа землетрясений до и после МБ. По оси ординат – ежесуточное количество землетрясений, по оси абсцисс – время, отсчитываемое от начала магнитных бурь (сут)

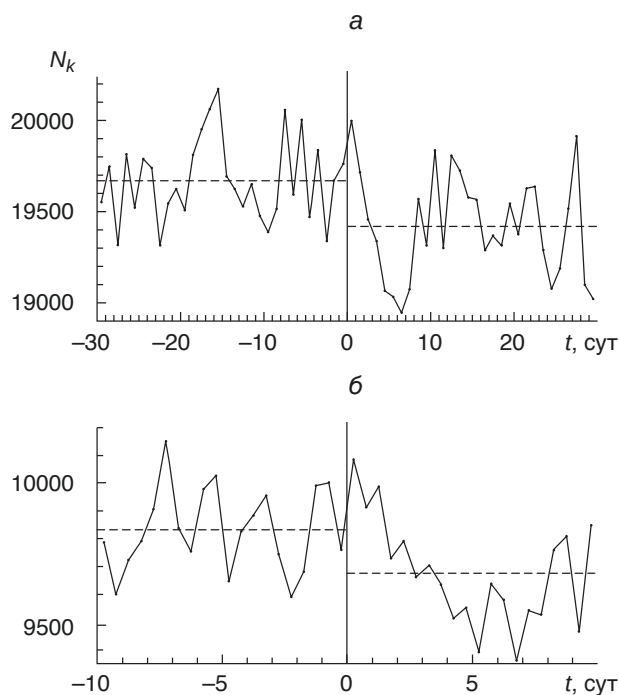


Рис. 4. Изменение глобальной сейсмичности Земли в интервале ± 30 сут до и после солнечных событий, вызвавших на Земле магнитные бури (а) и аналогичная зависимость, построенная во временном окне ± 10 сут с более высоким разрешением по времени (б). Обозначения те же, что и на рис. 3

возникновения тех же магнитных бурь с внезапным началом. Время их возникновения определялось как

$$T_j = t_j - S_c/v_j, \quad (2)$$

где t_j – время j -той МБ, взятое из каталога магнитных бурь, v_j – скорость фронта солнечной плазмы, зафиксированная в это же самое время на границе магнитосферы Земли ИСЗ IMP-8, и S_c – расстояние от Солнца до Земли. При этом не учитывалось ежегодное изменение S_c и некоторые другие факторы. Однако оценка возможных погрешностей показала, что они не должны превышать 0.2 сут, что вполне приемлемо.

Полученная при этом осредненная зависимость ежесуточного количества

землетрясений от времени представлена на рис. 4, а. Видно, что после солнечных событий происходит уменьшение количества землетрясений, а через 8–9 сут их число вновь начинает возрастать, постепенно возвращаясь к уровню фона. В отличие от предыдущего случая (см. рис. 3), здесь наблюдается более резкое затухание сейсмичности, начало которого совпадает по времени с солнечными событиями, послужившими причиной МБ. Последнее обстоятельство наиболее четко видно на рис. 4, б, где представлена аналогичная зависимость, построенная с более высоким разрешением по времени. Все это подтверждает предположение о влиянии электромагнитного излучения Солнца (ЭИС) на сейсмичность.

В связи с этим по той же самой методике было изучено изменение интенсивности излучения Солнца в радиочастотном диапазоне, которая часто используется как мера его ионизирующего излучения (ультрафиолетового, рентгеновского) и индикатор плотности заряженных частиц в ионосфере. На рис. 5, а представлено изменение ЭИС во временном окне ± 30 сут от начала магнитных бурь. Видно, что мощность радиоизлучения имеет единственный максимум, который опережает МБ на трое суток, что совпадает по времени с началом снижения сейсмической активности на рис. 3, а и 3, б. После введения поправок на время распространения солнечной плазмы с помощью соотношения (2) этот максимум приобретает более резкий вид и совпадает по времени с солнечными событиями, ставшими причиной маг-

нитных бурь (рис. 5, б). Следовательно, всплески интенсивности ЭИС должны более точно отражать моменты воздействия электромагнитного излучения Солнца на сейсмичность Земли.

Поэтому вместо магнитных бурь в качестве реперов для выбора временных окон были использованы моменты резкого повышения мощности ЭИС. Формально такие моменты определялись как времена, когда скорость изменения мощности излучения Солнца (dW/dt) в радиочастотном диапазоне превышала 95%-ный доверительный интервал. Всего за рассматриваемый период времени было обнаружено 949 резких всплесков ЭИС, что сопоставимо с числом магнитных бурь.

На рис. 6 показана зависимость от времени количества землетрясений до и после этих всплесков, полученная, как и раньше, методом наложения эпох по событиям представительных магнитуд (рис. 6, а) и по всем землетрясениям в каталоге (рис. 6, б). На них хорошо видно, что после повышения интенсивности ЭИС происходит резкое уменьшение количества землетрясений, которое совпадает с ними по времени (еще лучше это видно на рис. 6в, где показан фрагмент последней зависимости шириной ± 3 сут, построенный с более высоким разрешением по времени). Сразу же после всплесков количество землетрясений падает, а через 2–3 сут начинает плавно возрастать. Тем не менее на протяжении 10 сут их число остается ниже уровня фона.

В табл. 1 представлены численные оценки изменения количества землетрясений, которые наблюдались на рисунках 3, 4 и 6. Из нее следует, что

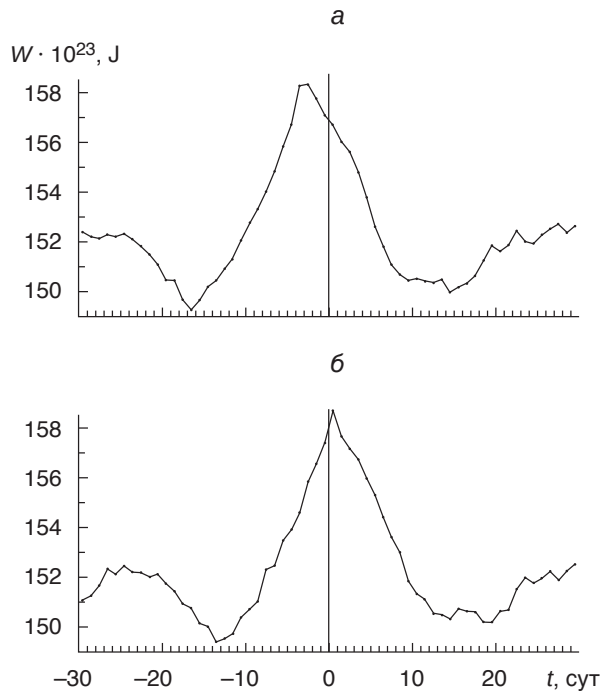


Рис. 5. Изменение мощности излучения Солнца в радиочастотном диапазоне в интервале ± 30 сут до и после магнитных бурь с внезапным началом (а) и после солнечных событий, послуживших причиной их возникновения (б)

Таблица 1

Изменения среднего количества землетрясений (ΔN) и их статистическая значимость (P) после геомагнитных бурь, событий на Солнце, послуживших причиной их возникновения, и интенсивных всплесков, электромагнитного излучения Солнца в пределах временных окон шириной ± 10 и ± 3 сут (ЭИС₃) от времени их воздействия

Триггер	ΔN , %	P
МБ	–1.1	0.0023
МБ _с	–1.6	0.0007
ЭИС	–2.5	0.0002
ЭИС ₃	–5.7	0.0001

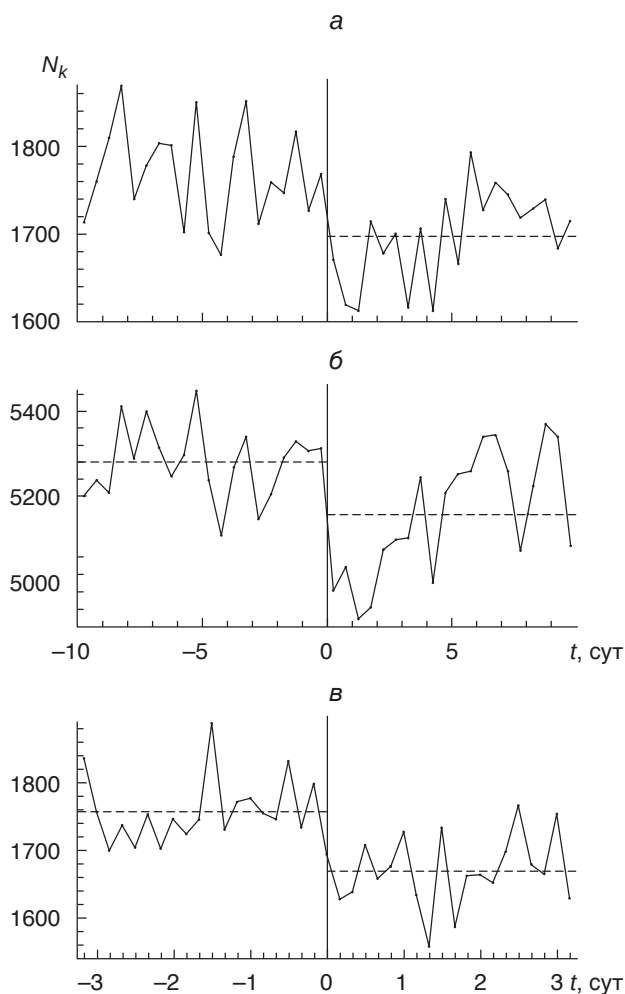


Рис. 6. Изменение во времени количества землетрясений представительных магнитуд (а) и всех представленных в каталоге событий (б), в интервале ± 10 сут до и после резких повышений мощности ЭИС и аналогичная зависимость, построенная в окне ± 3.2 сут с более высоким разрешением по времени (в). Обозначение те же, что и на рис. 3

лись много меньше значения 0.05, обычно принимаемого в геофизике за уровень значимости.

Таким образом, и после МБ, и после ЭИС наблюдается некоторое подавление глобальной сейсмичности Земли. Интересно, что при этом средняя и суммарная энергия землетрясений (СЭ) возрастает, причем не на несколько процентов, как это было с количеством землетрясений, а на десятки, что следует из табл. 2, где представлены их оценки. Однако

уменьшение числа событий после МБ составляет всего около одного процента от уровня фона. После событий на Солнце, послуживших причиной возникновения геомагнитных бурь, оно примерно в полтора раза больше. Более сильное воздействие оказывают всплески ЭИС, особенно в первые трое суток. После них происходит уменьшение количества землетрясений почти на 6%. Несмотря на то, что выявленные изменения сейсмичности очень невелики, статистически они высоко значимы. Это видно из представленных в таблице оценок их статистической значимости, которые оказа-

Таблица 2

Изменения средней энергии землетрясений (ΔE) после МБ и ЭИС и их статистическая значимость (P), а также отношение суммарной энергии (E_a/E_b) землетрясений, возникших после и до них, и аналогичные оценки, полученные по выборке МБ, до и после которых не фиксировалось ЭИС, и выборке ЭИС, до и после которых не наблюдалось МБ

Триггер	ΔE , %	P	E_a/E_b
МБ все	57.1	0.082	1.55
ЭИС все	33.6	0.089	1.32
МБ без ЭИС	58.5	0.049	1.52
ЭИС без МБ	-70.8	0.043	0.27

такие изменения статистически не значимы (так как значимость существенно больше 0.05). Это может быть связано с тем, что вариабельность этой характеристики сейсмичности значительно больше вариабельности ежесуточного количества землетрясений, но, по-видимому, существует и другая причина. На такую мысль наводит рисунок 7, а, на котором в качестве примера представлена зависимость от времени средней ежесуточной энергии землетрясений до и после ЭИС.

На нем видно, что после ЭИС средняя энергия землетрясений изменяется во времени очень неупорядоченно. В первые двое суток она заметно уменьшается относительно уровня фона. В следующие двое суток, напротив, возрастает, затем опять падает и т.д. Из этого следует только то, что после ЭИС возрастает ее дисперсия. Можно предположить, что это происходит в результате противоположного влияния на среднюю энергию землетрясений двух рассматриваемых факторов – МБ и ЭИС. Однако оценки изменения средней энергии после МБ и ЭИС, на первый взгляд, это не подтверждают (см. табл. 2). Тем не менее нельзя исключить, что это связано с большими погрешностями их определения, которые и послужили причиной их низкой статистической значимости.

Поэтому влияние этих двух факторов на энергетические характеристики сейсмичности было изучено по отдельности. Сначала с этой целью из общего числа ЭИС были отобраны только те, до и после которых не возникало МБ. Используя полученную при этом выборку в качестве реперов для выбора

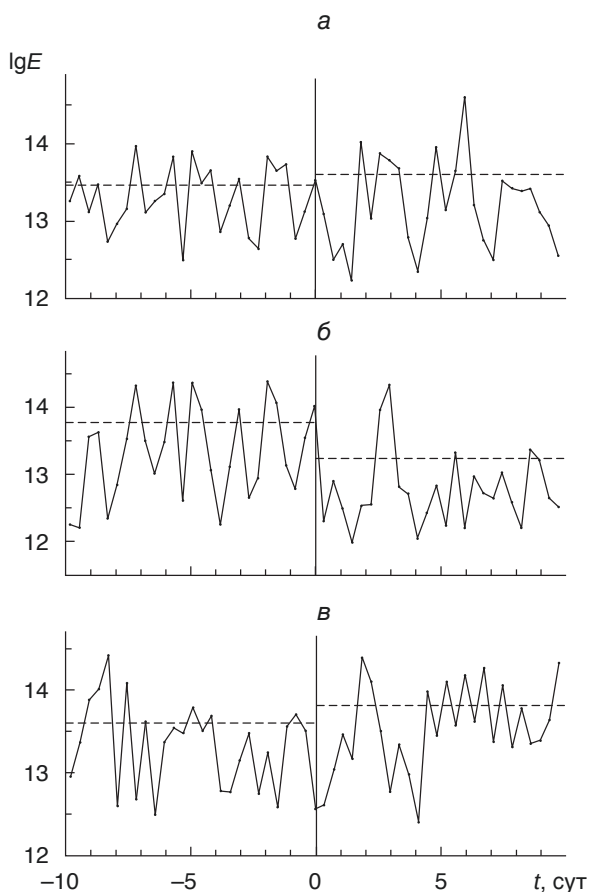


Рис. 7. Изменение во времени средней ежесуточной энергии землетрясений до и после интенсивных всплесков электромагнитного излучения Солнца (а), аналогичная зависимость, полученная по всплескам, до и после которых не возникало магнитных бурь (б), и изменение средней энергии землетрясений до и после МБ, до и после которых не фиксировалось всплесков ЭИС (в). По оси ординат в логарифмическом масштабе отложена средняя энергия землетрясений в Дж, по оси абсцисс – время, сут. Остальные обозначения те же, что и на рис. 3

временных окон, по той же самой методике что и раньше, было изучено изменение во времени средней энергии землетрясений до и после электромагнитных всплесков и их суммарной энергии. На рисунке 7, б, где показано ее изменение во времени, видно, что сразу же после электромагнитных

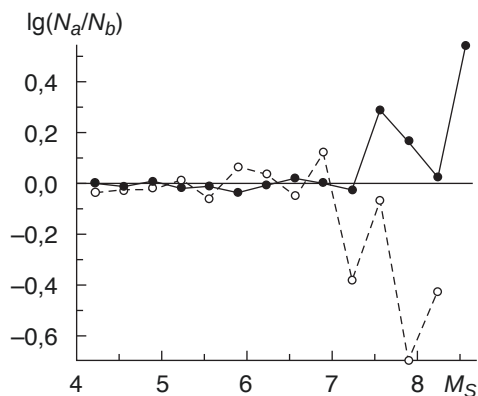


Рис. 8. Отношение количества землетрясений (N_a/N_b), возникших после и до всплесков электромагнитного излучения (пунктир, светлые кружки) и после и до геомагнитных бурь (сплошная линия, темные кружки) в зависимости от их магнитуды

всплесков происходит резкое уменьшение энергии землетрясений.

Аналогично было изучено изменение средней энергии после магнитных бурь. Из их общего числа была произведена выборка только тех бурь, до и после которых не фиксировалось интенсивных всплесков ЭИС, и построена зависимость, характеризующая изменение средней энергии землетрясений до и после магнитных бурь в отсутствие ЭИС (рис. 7, в). В отличие от предыдущего случая, здесь наблюдается повышение средней энергии землетрясений, которое происходит после магнитных бурь с задержкой в несколько суток.

Численные оценки наблюдаемых на рис. 7, б и 7, в изменений средней энергии землетрясений (ΔE) после ЭИС и МБ также представлены в табл. 2. Из нее следует, что воздействие ЭИС приводит к уменьшению средней энергии землетрясений относительно уровня фона почти на 71% и к ее увеличению после МБ на 58,5%, и эти изменения оказались уже статистиче-

ски значимы, поскольку в обоих случаях значимость оказалась меньше 0,05. Такие же выводы следуют и из анализа представленных в этой же таблице значений отношения суммарной энергии всех землетрясений, произошедших после и до МБ (E_a/E_b). Таким образом, после всплесков ЭИС происходит не только уменьшение количества землетрясений, но и их энергии. Однако после МБ число сейсмических событий также несколько уменьшается, но при этом их энергия, напротив, существенно возрастает.

Немаловажно понять, как при этом землетрясения перераспределяются по своим энергиям. Для этого по землетрясениям разных магнитуд M_S был произведен подсчет их числа до (N_b) и после (N_a) ЭИС и отношения N_a/N_b , характеризующего изменение количества таких сейсмических событий после всплесков ионизирующего излучения Солнца. На рис. 8 эти отношения представлены в зависимости от магнитуд землетрясений, по которым они определялись. На нем же представлена аналогичная зависимость отношения N_a/N_b количества землетрясений, возникших после и до геомагнитных бурь. Из него следует, что количество слабых и умеренных сейсмических событий с $M_S < 7$ как после ЭИС, так и после МБ, меняется очень незначительно. При этом число сильных землетрясений с $M_S \geq 7$ после всплесков ЭИС почти в 4 раза уменьшается, а после МБ, напротив, более чем в 3 раза возрастает.

Эти результаты были проверены и другим способом. Для этого были построены зависимости от времени количества сильных землетрясений с магнитудой $M_S > 7$ до и после ЭИС и МБ. Но поскольку таких сильных землетрясений относительно немного, период наблюдений был расширен. Рассматривались сейсмические события, произошедшие в интервале 1973–2020 гг. Всего таких землетрясений оказалось 349.

При этом, как и раньше, в качестве реперов для выбора временных окон использовались выборки ЭИС, до и после которых не было МБ, выборки МБ, до и после которых не фиксировалось всплесков ЭИС.

Полученные при этом зависимости количества землетрясений от времени даны на рис. 9. Там же показаны средние значения числа землетрясений до (уровень фона) и после воздействия рассматриваемых факторов. На нем хорошо видно, что после всплесков ионизирующего излучения Солнца число землетрясений с $M_S > 7$ заметно уменьшается (рис. 9, а). После геомагнитных бурь, напротив, наблюдается активизация таких землетрясений, которая возникает с задержкой в несколько суток (рис. 9, б).

Однако наиболее сильная, но относительно непродолжительная активизация событий с $M_S > 7$ возникает после МБ в результате комбинированного воздействия, когда за трое суток и менее они предваряются всплесками ЭИС. Для его изучения была получена выборка магнитных бурь, перед которыми в течение трех суток фиксировались всплески ЭИС, а в остальное время их не наблюдалось. На рис. 3, в, где представлен полученный результат, видно, что после такого воздействия возникает резкая активизация, которая продолжается всего около трех суток. В отличие от предыдущего случая, она начинается сразу же после МБ, без заметной задержки.

Численные оценки изменения среднего количества таких землетрясений представлены в табл. 3. Из нее следует, что воздействие ЭИС приводит к ста-

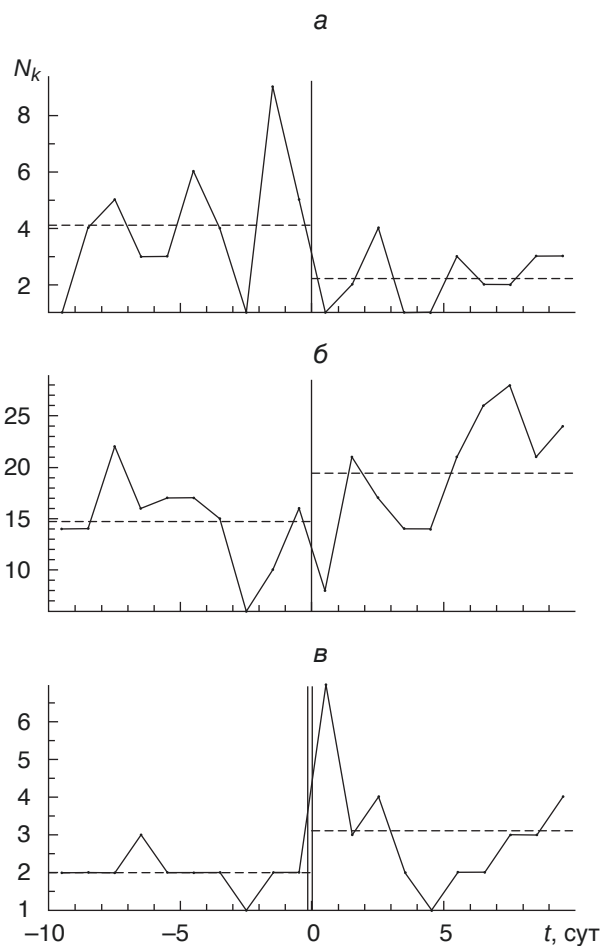


Рис. 9. Изменение во времени количества землетрясений с $M_S > 7$, произошедших на Земле за период 1973–2020 гг., до и после интенсивных всплесков электромагнитного излучения Солнца (а), геомагнитных бурь (б) и до и после одновременного воздействия этих двух факторов

тистически значимому уменьшению количества землетрясений с $M_S > 7$ на 46% от уровня фона. После магнитных бурь их число, напротив, статистически значимо возрастает на 32%. Но наиболее сильный прирост числа землетрясений (на 55%) происходит после МБ, непосредственно перед которыми появлялись интенсивные всплески ионизирующего излучения Солнца. Однако

Таблица 3

Изменение во времени количества землетрясений с $M_5 > 7$, произошедших на Земле за период 1973–2020 гг., до и после интенсивных всплесков электромагнитного излучения Солнца (ЭИС), геомагнитных бурь (МБ), а также и до и после одновременного воздействия этих двух факторов, и то же самое во временном интервале ± 3 суток

Триггер	ΔN , %	P
ЭИС	–46.3	0.024
МБ	32.0	0.013
ЭИС и МБ	55.0	0.154
то же, 3 сут	133.3	0.035

в этом случае значимость очень мала. Связано это с тем, что наблюдаемая активизация сейсмичности продолжается всего трое суток. В этом временном интервале возрастание числа землетрясений по отношению к фону достигает уже 133%, а оценка значимости составляет 0.035.

Из всего этого следует, что после интенсивных всплесков ЭИС вероятность возникновения катастрофических землетрясений уменьшается почти в два раза, после магнитных бурь, напротив, почти на треть возрастает. Но наиболее сильно, более чем в два раза, она возрастает после магнитных бурь, перед возникновением которых в течение трехсуточного интервала фиксировались всплески интенсивности ионизирующего излучения Солнца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные результаты прежде всего показывают, что процессы, протекающие на Солнце, оказывают влияние на сейсмичность Земли и, следовательно, на состояние ее литосферы. Однако картина их взаимодействия очень сложная. Факторы разной физической природы, порождаемые солнечной активностью, могут влиять на литосферу Земли и ее сейсмичность разнонаправлено и менять характер своего воздействия в зависимости от их сочетания. Механизм такого воздействия также, по-видимому, различается.

Всплески ионизирующего электромагнитного излучения Солнца вызывают повышение ионизации ионосферы, что влияет на параметры глобальной электрической цепи, приводит к изменению грозовой активности атмосферы. Кроме того, они ухудшают условия распространения радиоволн от естественных и техногенных источников, что снижает интенсивность электромагнитного фона на огромных территориях и может быть причиной подавления сейсмичности. Геомагнитные бури оказывают более сильное триггерное воздействие на области подготовки сильных землетрясений. Это может быть связано с явлением магнитопластики, за счет которого при изменении магнитного поля может меняться скорость пластического течения массивов горных пород, а также с воздействием на области их подготовки теллурических токов, индуцированных в коре изменениями геомагнитного поля.

Уважаемые читатели, коллеги, друзья!

**Открыта подписка для физических лиц на номера 2022 года
научно-популярного журнала «Земля и Вселенная»**

Редакция журнала:

(495)276-77-35 (доб. 42-31), E-mail: zevs@naukaran.com

Шубинский пер., д. 6, стр. 1

С новыми книгами
Издательства “Наука”
вы можете ознакомиться на сайте
naukabooks.ru



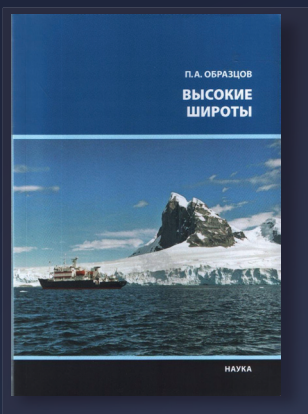
Капанадзе А.Л.

**Опытным путем:
Эксперименты, изменившие мир.**

М.: Наука, 2019. – 319 с.

В книге рассказывается об основных вехах в развитии экспериментальных методов в самых разных областях наук о природе, человеке и обществе – физике, химии, астрономии, биологии, физиологии, медицине, археологии, социологии, психологии, экономике. Охвачен период с античных времен до наших дней. Читатель узнает о знаменитых и малоизвестных опытах, оказавших огромное влияние на формирование наших представлений о мире и о нас самих. Большое внимание автор уделяет не только истории приборов и технологий, но и истории идей. Затрагиваются проблемы отличия классического эксперимента от наблюдения (когда опыт «ставит» сама природа), преемственности технических инноваций, влияния общественного климата на работу экспериментатора, роли случайности в этой работе.

Для широкого круга читателей.



Образцов П.А.

Высокие широты.

М.: Наука, 2018. – 192 с. – (Научно-популярная литература)

Книга повествует об открытии и освоении Арктики и Антарктики, этих двух полюсов холода и мужества, об отважных героях, благодаря которым человечество узнало о природе, животном мире самых северных и самых южных земель, а также о том, какая непростая и вместе с тем увлекательная жизнь идет сегодня в этих суровых, таинственных и манящих краях.

Для широкого круга читателей.



Верещагин Г.В., Аксенов А.Г.

Релятивистская кинетическая теория с приложениями в астрофизике и космологии.

М.: Наука, 2018. — 471 с.

Релятивистская кинетика широко применяется в астрофизике и космологии. В последние годы интерес к этой теории вырос, поскольку появилась возможность ставить эксперименты при таких условиях, где релятивистские эффекты становятся существенными. Настоящая монография состоит из трех частей. В первой части представлены основные идеи и концепции, уравнения и методы теории, включая вывод кинетических уравнений из релятивистской цепочки Боголюбова, а также соотношение кинетического и гидродинамического описаний. Вторая часть — это введение в вычислительную физику, причем особое внимание уделяется численному интегрированию уравнений Больцмана и смежным вопросам, а также многокомпонентной гидродинамике. В третьей части дан обзор приложений, который охватывает вопросы ковариантной теории отклика, термализации плазмы, комптонизации в статических и динамических средах, кинетики самогравитирующих систем, образования структуры в космологии и излучения нейтрино при гравитационном коллапсе.

Для студентов старших курсов университетов, аспирантов и исследователей, специализирующихся в области теоретической физики, астрофизики и космологии.

naukabooks.ru

Реклама

КОСМИЧЕСКИЕ ИЛИ НАЗЕМНЫЕ?

ШУСТОВ Борис Михайлович,

член-корреспондент РАН

Институт астрономии РАН

DOI: 10.7868/50044394822010054

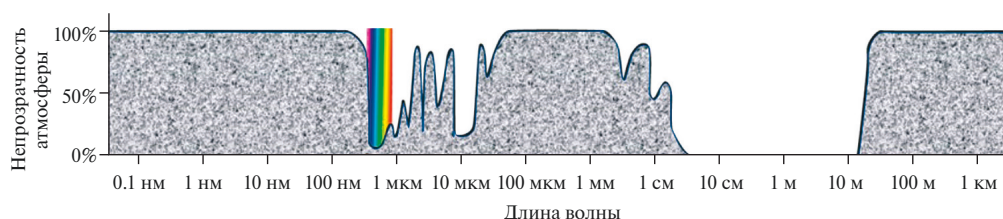
Казалось бы, необходимость выведения телескопов в космос общепризнана, но все же многие и специалисты, и неспециалисты в астрономии, узнав о том, какие гигантские стоимости имеют крупные космические обсерватории, высказывают мнение, что рациональнее было бы направить значительную часть этих средств на развитие наземной астрономии. В этой статье обсуждаются преимущества и недостатки космических телескопов, рассказывается, почему космические телескопы такие дорогие и почему все-таки эти средства нужно тратить. Хорошо бы, чтобы у читателей сложилось (укрепилось) представление о том, что правильнее ставить акцент не на противопоставлении двух основных технологических направлений, а на их синергии. В статье приведены примеры такой синергии.

ПЛЮСЫ И МИНУСЫ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

Мы вступили в новую эпоху науки о Вселенной, эпоху многоканальной астрономии. Суть многоканального подхода заключается в комплексном изучении электромагнитного излучения, гравитационных волн и элементарных частиц, таких как нейтрино и высокоэнергичные космические лучи, несущих информацию о космических объектах и процессах. Парадигму многоканальной астрономии

можно считать уже общепринятой. Читатели могут обратиться к первой профессиональной книге по этому вопросу (Многоканальная астрономия, под ред. А.М. Черепашука, М.: Век-2, 2018. ISBN: 978-5-85099-198-2).

Многоканальный подход к наблюдениям предполагает также многоволновой (всеволновой) подход, т. е. возможность наблюдения космических объектов на всех длинах волн электромагнитного излучения. Многоволновая концепция неизбежно предполагает привлечение космических средств наблюдения, поскольку возможности наземных телескопов сильно ограничены прозрачностью земной атмосферы. Напомню читателям, что земная атмосфера непрозрачна почти во всем диапазоне электромагнитного спектра, простирающегося более чем на 19 порядков – от самых коротких гамма-лучей с длиной волны 10^{-5} нм до сверхдлинных радиоволн с длиной волны во многие километры. На рисунке на стр. 64 показано, насколько непрозрачна наша атмосфера. Показан не весь диапазон длин волн электромагнитного спектра, поскольку и в самой коротковолновой, и в самой длинноволновой частях спектра атмосфера полностью непрозрачна. Существующие окна прозрачности – провалы на графике – это те участки диапазона, которые доступны для наблюдений с наземными телескопами. Радужной расцветкой показан диапазон шириной всего лишь в 0.3 порядка, которым мы пользуемся для



Непрозрачность земной атмосферы для электромагнитного излучения. Рисунок автора

наблюдения Вселенной нашим природным приемником – глазами.

Именно непрозрачность атмосферы обусловила разработку и реализацию многих проектов космических обсерваторий. Такие обсерватории позволили (и позволяют) нам, людям, не быть слепыми (или полуслепыми) исследователями Вселенной, подобными слепцам из восточной притчи, пытающимся понять, что такое слон. Очевидный смысл следующего рисунка, сделанного по мотивам этой притчи, в том, что нужно пытаться «ощупывать» (изучать) Вселенную максимально разнообразными средствами. В качестве примеров приведены несколько каналов получения информации: наземные средства и названия некоторых космических проектов: обсерваторий рентгеновского диапазона *ХММ* (Европейское космическое агентство *ESA* в кооперации с американским космическим агентством *NASA*) и отечественной «Спектр-РГ»; ультрафиолетовых (преимущественно) обсерваторий Космический телескоп им. Хаббла (*HST*, *NASA*) и УФ-обсерватория «Астрон» (проект реализован еще в СССР); инфракрасной обсерватории *Spitzer* (*NASA*) и радиоинтерферометра «Спектр-Р» (Роскосмос).

Но разнообразие средств не поможет, если не координировать (т. е. не сравнивать, не объединять, не отбраковывать и т. д.) поток знаний, идущий по разным каналам. Слепые из притчи так и не смогли составить общее описание слона,

поскольку каждый настаивал только на своей частичной информации. Правильный подход к сложению знаний создает эффект синергии, т. е. усиливающий эффект взаимодействия двух или более факторов, характеризующийся тем, что совместное действие этих факторов существенно превосходит простую сумму действий каждого из указанных факторов. На синергии космических и наземных каналов исследований космоса мы еще остановимся.



Многоволновой подход. Рисунок автора

Достоинства и недостатки редко бывают абсолютными. Перечислим достоинства и недостатки космических обсерваторий, сопровождая небольшими комментариями, иллюстрирующими относительность этих «плюсов» и «минусов».

Плюсы

- **Всеволновость.** Этот фактор уже рассмотрен выше.

- *Независимость от погоды.*
- *Относительная независимость от времени суток.* Это так, но далеко не всегда. Так, например, знаменитый *HST* может наблюдать не все время, а лишь на ночной стороне витка, т. е. не более 50% орбитального периода. Кроме того, даже для телескопа в более далеком космосе есть аналог дневного неба. Это зоны небесной сферы вокруг Солнца, Луны, Земли и даже вокруг ярких планет и звезд. Например, для телескопов оптического диапазона область неба вокруг Солнца угловым радиусом менее 40° недоступна из-за неприемлемо высокой для чувствительного инструмента уровня паразитной засветки. Еще более жесткие ограничения накладываются на инструменты ИК-диапазона.
- *Возможность использования фактора пространства.* Например, в упомянутом проекте «Спектр-Р» первое преимущество не используется, и наоборот, использован тот факт, что атмосфера в рабочем диапазоне частот проекта прозрачна. Но зато в проекте реализована возможность использования сверхдлинной базы (до 300 тыс. км), что невозможно с наземными интерферометрами со сверхдлинной базой. Это позволило реализовать в наблюдениях сверхвысокое угловое разрешение (7 мкс дуги). Приведем еще один пример использования пространственного фактора. Для проекта длинноволнового радиотелескопа, который активно прорабатывается международной командой (с участием российских специалистов из АКЦ ФИАН им. П.Н. Лебедева), важным фактором является возможность использования Луны как экрана, позволяющего отгородиться от радиопомех от источников на Земле, ионосферы, спутников на околоземной орбите и радиопомех Солнца во время лунной ночи.

- *Другие факторы.* Один из важных факторов – престиж страны. Как бы то ни было, уровень космической науки в значительной степени определяет авторитет страны на международной арене как технологически высокоразвитой державы. Еще одним фактором является стимулирование развития высоких технологий. Например, проекты обсерваторий инфракрасного (ИК) диапазона: *WISE*, *Spitzer*, *WFIRST* и т. д., в которых ставились предельные требования, стимулировали создание в США превосходных ИК-приемников излучения. В России таких пока нет, может быть, потому что требования для военных применений не столь жестки, как те, что предъявляют астрономы. К сожалению, фундаментальные космические исследования в космической программе России все-таки имеют низкий приоритет и наши запросы не в счет.

Минусы

- *Высокая стоимость.* Фактор стоимости мы обсудим чуть ниже.
- *Относительно более низкая надежность.* Это вполне понятно, так как возможности устранения сбоев (например, ремонта) для космических обсерваторий весьма ограничены. Могут возразить, что, например, *HST* работает с 1990 г. Но это все-таки особый случай. Для поддержания работоспособности телескопа NASA выполнило за эти годы шесть специальных космических полетов (сервисных миссий), каждая стоимостью около миллиарда долларов. Есть примеры и других работающих космических долгожителей (например, обсерватория *SOHO* (NASA) для наблюдений Солнца), но это, скорее, исключения. Неудача космического проекта, как правило, практически обнуляет многолетние усилия большой группы ученых

и технических специалистов. Космический проект может потерпеть неудачу еще на Земле. Пример – проект космического интерферометра оптического диапазона *SIM* (NASA). По проекту работала большая международная команда, кстати, в том числе и представители Института астрономии РАН. Когда на проект было потрачено уже около 0.5 млрд долларов США (половина планировавшейся стоимости проекта), NASA приняло решение о полном прекращении работ. И таких примеров немало.

- *Относительно меньшая доступность.* Наземные обсерватории в среднем гораздо доступнее, прежде всего потому, что их несравненно больше. Снова приведем в пример обсерваторию *HST*. По сообщению Поля Херца (P. Hertz), директора отделения астрофизики директората научных программ NASA, по состоянию на сентябрь 2018 г. отношение числа вполне состоятельных с научной точки зрения заявок к числу реализованных (так называемый «фактор давления заявок», *proposal pressure*) составило для обсерватории *HST* примерно 4 (тут важно знать, что если руководитель заявки – астроном США, значение ниже, а в других случаях выше), для обсерватории *SWIFT* (NASA) – 5, для предварительного цикла заявок на готовящийся к запуску Телескоп Джеймса Уэбба (*JWST*, NASA) – 8. Для наземных телескопов факторы давления намного ниже. Автор в течение 20 лет был членом Комитета по распределению времени на больших телескопах (КТБТ) и может подтвердить, что фактор давления заявок на самые ценные (безлунные) ночи на самый востребованный российский телескоп БТА не превышал 3, а на лунные ночи был близок к 1.

Можно добавить и другие плюсы и минусы, но оставим это читателю.

А сначала ответим на вопрос, который вызывает самую оживленную дискуссию.

СКОЛЬКО СТОЯТ ТЕЛЕСКОПЫ?

Стоимость космических обсерваторий по сравнению с наземными весьма высока. Бюджет проекта *HST* с учетом затрат на создание обсерватории и обеспечение его работы (включая расходы на функционирование специально созданного института Space Telescope Institute) на настоящий момент превышает 10 млрд долларов. Не менее дорогим оказался проект инфракрасного 6-метрового космического телескопа *JWST*, затраты только на создание которого составят около 8.8 млрд долларов (при начальном бюджете около 3 млрд долларов), а общий бюджет, включая 5-летнюю эксплуатацию, 9.7 млрд долларов (см. на сайте NASA бюджетные оценки по состоянию на 2019 г.). Конечно, стоимость крупных физических экспериментов (таких, например, как Большой адронный коллайдер) гораздо выше, но все-таки для астрономии суммы выглядят ошеломляюще крупными.

Оценить стоимость космического проекта или даже какой-то его уникальной части не так уж и просто. Промышленные стандарты, вполне пригодные для оценки стоимости серийной продукции, здесь почти не работают. Например, стоимость создания уникального немецкого прибора обсерватории «Спектр-РГ», успешно работающей в космосе уже более полутора лет – рентгеновского телескопа *eRosita* – в исходном варианте оценивалась в 20–25 млн евро. Ряд организационных и технических нестыковок, проявившихся в процессе разработки и создания прибора, привел к росту стоимости более чем в пять раз. И это немецкие экономические технологии,

часто приводимые в пример, как некий стандарт четкого планирования проектов!

Тем не менее технологии оценки проектов разрабатываются и совершенствуются. Без них было бы просто невозможно сколь-нибудь организованно осуществлять космическую деятельность. Есть такие технологии и в России, но, как это часто у нас бывает, соответствующая информация противоречива и неполна. Финансовая часть Федеральной космической программы 2016–2025 гг., одного из основных плановых документов космической деятельности в России, включающего и фундаментальные космические исследования, вообще, ограничена доступом. Данные зарубежных исследователей более полны и системно структурированы. Поэтому для описания базовых оценок здесь используем эти данные. В Центре космических полетов имени Маршалла (NASA) разработана 5-параметрическая модель MSFC OTA затрат на создание крупных наземных и космических телескопов. Автор модели Филипп Сталь (Philip Stahl) разрабатывал и совершенствовал модель более 20 лет. Исследовались различные возможные корреляции стоимости телескопа (C) с основными параметрами. Наиболее четко выраженными оказались зависимости от диаметра апертуры (D), рабочего диапазона длин волн λ (более определенно, λ – это характерная «центральная» длина волны рабочего диапазона, считается, что на этой длине волны и на более длинных волнах обеспечивается дифракционное качество оптики), рабочей температуры (T) и года начала создания летного образца (Y). Самый свежий вариант модели (2020 г.) описан в документе, который можно скачать на странице (<https://baas.aas.org/pub/2020n7i143/release/1>).

В научно-популярных журналах обычно избегают формул, но так же, как в описании методик оценки числа

цивилизаций не обойтись без формулы Дрейка, так и здесь формула совершенно необходима. Вот она:

$$C = 20 \times SG \times D^{1.7} \times \lambda^{-0.5} \times T^{-0.25} \times e^{-0.028(Y-1960)},$$

где C измеряется в млн долларов США, SG – множитель, равный 30 для космического и 1 для наземного телескопа соответственно. Диаметр апертуры измеряется в метрах, длина волны в микронах, температура в Кельвинах. Последний множитель – экспонента – отражает снижение стоимости однотипных (серийных) технологий со временем. Он привязан к практике, сложившейся в США. В России есть примеры, когда стоимость однотипных изделий космической индустрии со временем только растет, и довольно сильно. Например, стоимость платформы «Навигатор», базовой для обсерваторий серии «Спектр», за 20 лет выросла на порядок. Еще один фактор, не отраженный в формуле, – длительность периода времени (по сравнению с изначально планировавшимся), за которое проект реализуется. Это свидетельствует о различных непредвиденных трудностях как организационных, так и технических, и существенно сказывается на стоимости. Пример – уже упоминавшиеся зарубежные *JWST*, *eRosita*, все российские обсерватории серии «Спектр» и др.

Описанная модель основана на базе данных о 20 наземных и 27 космических телескопах. В числе космических телескопов проекты *Herschel*, *HST*, *IRAS*, *JWST*, *Kepler*, *Planck*, *Spitzer*, *WISE*, *WMAP*, *GALEX*, *IUE* и др., а среди наземных телескопов *Gemini 1*, *HET*, *KECK 1&2*, *LBT*, *Magellan 1*, *Subaru*, *UKIRT* и даже радиотелескопы *Submillimeter Array (SMA)* и *Green Bank Radio Telescope*. Для 20 наземных телескопов диаметр варьировался в диа-

пазоне 1–100 м, λ – от 500 нм до 21 см, Y с 1979 по 2020 г. В базе данных было 14 монолитных и 6 сегментированных главных зеркал. Для 27 космических телескопов диапазоны параметров следующие: D – от 30 см до 6.35 м; λ в диапазоне 0.4–2 мкм; T – от 4 до 300 К, Y с 1962 по 2020 г. В этой выборке было 23 монолитных и 4 сегментированных зеркала.

Модель затрат MSFC OTA предоставляет оценку наиболее вероятной стоимости. Неопределенность этой оценки составляет около 50%. Основные выводы, вытекающие из этой модели, довольно тривиальны и заключаются в следующем:

- Космический телескоп примерно в 30 раз дороже наземного телескопа с тем же диаметром апертуры и ограничениями на дифракционное качество оптики.
- Большие телескопы стоят дороже, чем меньшие.
- Оптика дифракционного качества дороже для более коротких длин волн.
- Криогенные телескопы стоят дороже «теплых».
- Стоимость телескопа в США (при тех же технических характеристиках)

снижалась примерно на 50% каждые 25 лет предположительно из-за технического прогресса.

Важно отметить, что приведенная формула выведена для оценки стоимости не всей обсерватории, и даже не всего телескопа, а только стоимости создания оптико-механического блока (ОМБ, Optical Telescope Assembly – OTA) телескопа. ОМБ включает оптику, механические конструкции, служебную электронику и не включает научные инструменты. По терминологии NASA для космических проектов, описанная модель оценивает только стоимость этапов A–D, то есть проектирования, разработки, интеграции и тестирования ОМБ телескопов.

Интересно, что, согласно этим исследованиям, применение сегментированных зеркал не критично сказывается на стоимости. Такие зеркала имеют свои преимущества и свои существенные недостатки. Например, по состоянию на 2020 г. оценка стоимости амбициозного проекта самого большого строящегося (начало в 2012 г.) оптического 39-метрового телескопа *E-ELT* (главное зеркало состоит из почти 800 сегментов), по последним данным из Евро-

Башни телескопов Цейсс-2000 обсерватории Терскол (слева) и Pan-STARRS1 (Гавайи, США).
Фото из сети Интернет

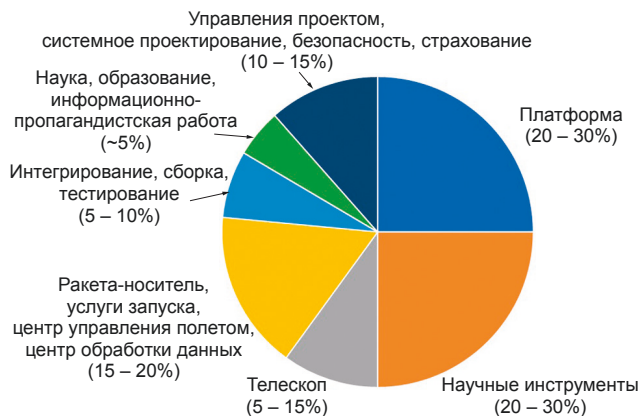


пейской южной обсерватории (см. <https://www.eso.org/public/announcements/ann20034/>), составляет примерно 1.5 млрд долларов. Это неплохо согласуется с оценкой стоимости ОМБ по обсуждаемой формуле (примерно 780 млн долларов).

В формуле не отражены некоторые важные зависимости. Для наземных телескопов большое значение имеет поле зрения. Широкоугольный телескоп (например, знаменитый *Pan-STARRS* (США), у которого апертура составляет 1.8 м, а диаметр поля зрения 3°) в десятки раз дороже, чем обычный телескоп 2-м класса, такой, например, как Цейсс-2000 Терскольской обсерватории (диаметр поля зрения примерно 1°). На рисунке на стр. 68 показан внешний вид башен этих телескопов.

Естественно, что при оценке любого проекта нужно рассматривать бюджет всех его составляющих. Многие считают, что стоимость телескопа в основном определяет и стоимость всего проекта. Для наземных телескопов эта оценка более или менее близка к реальности. При строительстве крупного оптического телескопа (такого, как БТА) затраты на строительство купола, различные инфраструктурные составляющие, как правило, сравнимы со стоимостью самого телескопа. Однако подобное утверждение для космических проектов уже не работает. Чтобы проверить это, уже упоминавшийся Филипп Сталь собрал данные анализа затрат для 14 миссий, среди которых такие известные астрофизические проекты, как *GALEX*, *JWST*, *Kepler*, *Spitzer*, *SWAS*, *WIRE*, *WISE*, *WMAP*, гелиофизические проекты *STEREO* и *TRACE*,

Схема распределения затрат на космический проект



Структура стоимости космических проектов в принятой в NASA разбивке (источник: Philip Stahl <https://baas.aas.org/pub/2020n7i143/release/1>)

а также ИСЗ для дистанционного зондирования Земли *CALIPSO*, *CLOUDSAT*, *ICESAT*, *LANDSAT-7*. На рисунке выше показана структура стоимости работ по этим 14 проектам в принятой в NASA стандартной разбивке. Указаны средние доли затрат на каждую составляющую.

Как видно из этой диаграммы, стоимость ОМБ телескопа (т. е. собственно телескопа) составляет лишь относительно небольшую долю стоимости всего проекта. Правда, эта доля зависит от размера телескопа: чем крупнее телескоп, тем больше эта доля. В проекте *JWST* стоимость ОМБ составляет 17% от стоимости проекта, в проекте *HST* – 10%. Основными затратными составляющими проектов являются научные инструменты, космическая платформа и запуск. Прокомментируем эти составляющие.

Стоимость научных инструментов зачастую может быть сравнима, но чаще всего заметно превышает стоимость ОМБ телескопа. Отдельные инструменты могут быть весьма дорогими (с точки зрения астрономов). Например, для космического телескопа

им. Хаббла было создано множество научных инструментов. Стоимость лишь одного из них – спектрографа COS – превысила 250 млн долларов США. В российском проекте «Спектр-УФ» стоимость блока спектрографов и блока камер поля заметно превышает стоимость ОМБ телескопа (в основном из-за дороговизны импортных приемников УФ-излучения).

Роль платформы – служебная и заключается в обеспечении энергопитания, ориентации космического аппарата (включая наведение и стабилизацию направления), связь и передачу данных. В разных проектах платформа реализуется по-разному. Например, для обсерватории HST все служебные системы и собственно телескоп интегрированы в один сложный и уникальный комплекс. Для обсерваторий серии «Спектр» в АО «НПО Лавочкина» создан типовой модуль – платформа «Навигатор». «Навигатор» имеет стандартный набор функций и лишь некоторые узлы создаются для конкретного проекта, например, высокоинформативный радиокомплекс ВИРК для проекта «Спектр-Р». «Навигатор» доказал свою работоспособность и эффективность уже в нескольких проектах, как в научных («Спектр-Р», «Спектр-РГ»), так в спутниках ДЗЗ («Электро-Л»). Существенное возрастание стоимости платформы «Навигатор» мы уже обсуждали выше.

Затраты на запуск обычно оценивают через стоимость вывода 1 кг полезного груза на околоземную круговую орбиту. Эта стоимость включает и стоимость ракеты-носителя, и услуги космодрома и ряд других затрат. Типичная стоимость составляет от 4 до 25 тысяч долларов. Для примера – каждый запуск 80-тонного американского космического челнока (*Space Shuttle*) обходился почти в 1 млрд долларов.

Кроме того, затраты на управление проектом, проектирование систем, без-

опасность и страховое обеспечение миссии составляют больший процент от общей стоимости миссии, чем телескоп.

Важно отметить, что, по стандартам NASA, в структуре затрат на космический проект есть раздел «Наука, образование, информационно-пропагандистская работа» и на него выделяется значительное финансирование (до 5%). В моей многолетней практике работы над проектом «Спектр-УФ» не удавалось добиться разрешения Роскосмоса на включение в смету хоть какого-то финансирования по этому направлению. Полагаю, что такая недооценка важности пропаганды научно-технических знаний и информирования общественности о российской программе фундаментальных космических исследований (*public outreach*) – не на пользу дела.

Синергия

В некоторых проектах наземные и космические телескопы являются необходимыми компонентами проекта. Например, в проекте «Спектр-Р», когда он работал в режиме интерферометра «космос-Земля», 10-метровый космический радиотелескоп работал совместно с сетью наземных радиотелескопов. Однако чаще всего наземные и космические телескопы работают по независимым программам. В последнее время растет понимание того, что нужно пытаться максимально согласовывать такие программы. Как пишет Джон О'Меара (John O'Meara), один из авторов очень важного документа – «Десятилетнего обзора по астрономии и астрофизике 2020 года» (*Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics 2020, Astro2020*), – «наука во многих случаях не только выигрывает от наземно-космической координации, но и требует ее. Наш нынешний режим нескоординированных исследований замедляет, затрудняет, а в некоторых случаях

останавливает научный прогресс». Эту позицию поддерживают многие другие авторы Astro2020, крупные эксперты во всех областях астрономии. Читатель может ознакомиться с Astro2020 на стр. <https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>. Такие обзоры перспективных направлений в астрономии на очередное десятилетие, выпускаемые коллективно Национальными академиями наук, технологии и медицины (НАСЕМ, США), широко известны как исключительно профессиональные и полезные для всех астрономов. Некоторый аналог сейчас есть и в России. Это утвержденная правительством РФ 31 декабря 2020 г. «Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы)» (см. текст программы, например, на стр. <http://static.government.ru/media/files/skzO0DEvyFOIBtXobzPA3zTyC71cRAOi.pdf>).

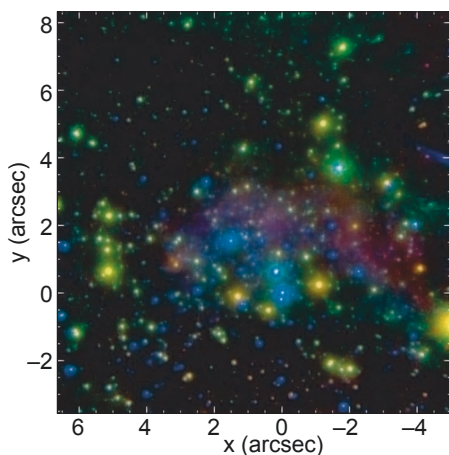
Рассмотрим на примерах совместную работу космических и наземных телескопов, которая позволяет вследствие синергии существенно увеличить эффективность использования обоих типов телескопов. Кстати, если читатель обратится к базе профессиональных астрономических публикаций ADS,

заказав поиск по наличию в названии статьи слова *synergy*, то получит почти 700 названий статей! Синергия может появляться в разных формах от скоординированных наблюдений до скоординированного подхода к обработке астрономических данных (например – Международная виртуальная обсерватория). Мы остановимся на форме синергии, обозначенной в названии статьи и обсудим, как оптические наземные телескопы используются для поддержки космических астрономических проектов различного назначения (и наоборот!).

Существует несколько типов поддержки:

- Совместные (как правило, многоволновые) наблюдения.
- Наземные испытания оптических научных и сервисных приборов.
- Астрометрическая (баллистическая) поддержка.

Конечно, совместные наблюдения являются самой важной частью поддержки. Они могут быть синхронными или асинхронными. Обычно проводятся асинхронные наблюдения, они дополняют друг друга. Приведем лишь один пример из работы Вакка и др. (Vacca et al.), опубликованной в 2007 г. (*Astrophysical Journal*. Vol. 662. P. 272–283). На рисунке из этой статьи показана небольшая



Изображение области неправильной галактики IC10 вокруг зоны ионизованного водорода 111с, составленное из фотографий, сделанных камерой WFC с фильтром F814W на телескопе HST и камерой NIRC2 в полосах H и K' на телескопа Keck1. В центре координат объект Вольфа-Райе разрешился на 6 голубых звезд (источник: William D. Vacca, Christopher D. Sheehy, and James R. Graham. *The Astrophysical Journal*, 2007. June 10. Vol. 662. P. 272–273)

(размером $10'' \times 10''$) область неправильной галактики IC10. Это карликовая галактика с интенсивным звездообразованием. Рисунок составлен из фотографий, сделанных с очень высоким разрешением в трех полосах (фильтрах): камерой WFC с фильтром F814W на телескопе HST и камерой NIRC2 в полосах H и K' телескопа Keck1 с применением лазерной звезды, обеспечивающей режим адаптивной оптики.

Совместное использование этих двух инструментов для исследования данного астрономического объекта позволило провести прямую идентификацию звезд асимптотической ветви гигантов (на снимке самые яркие красные звезды), выявить углеродные звезды (самые красные звезды). Анализ данных позволил сделать вывод о многократных вспышках звездообразования, произошедших в галактике и уточнить расстояние до IC10.

1.6-м телескопы АЗТ-33ВМ и АЗТ-33ИК Саянской обсерватории Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, 1.5-м телескоп РТТ-150 обсерватории Тютюбак и БТА включены в наземный оптический опорный комплекс обсерватории «Спектр-РГ». Уже опубликовано несколько интересных работ, выполненных по совместно полученным данным.

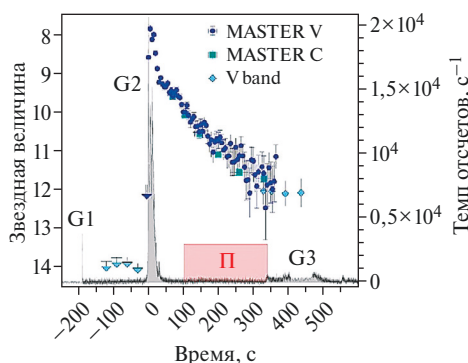
Для исследования переменных объектов особенно ценны синхронные наблюдения, которые позволяют судить о свойствах объекта в данный (один и тот же) момент времени. Синхронные наблюдения – основа важного направления астрономических наблюдений – наблюдений переходных процессов на различных временных шкалах. Наблюдения переходных процессов и объектов (такие объекты на астрономическом профессиональном языке называются транзиентами, по-английски *transients*) имеют смысл, когда выполнено следующее требование: временной интервал для перекрывающихся

наблюдений (с различными инструментами) должен быть короче временного масштаба изменений объекта.

Конечно, все в мире преходяще. Даже наша Галактика изменится до неузнаваемости через многие-многие миллиарды лет. Но обычно понятие транзиста понимают более ограниченно, как преходящее астрономическое событие (астрономический объект или явление), продолжительность которого может составлять от доли секунды до дней или даже нескольких лет. Примеры – вспышки сверхновых, новых, гамма-вспышки, приливные разрушения в окрестностях черных дыр, затмения, транзиты экзопланет, появления комет (а также экзокOMETная активность) и т. д. В общем, все, что обычно существенно меняется в каком-то смысле, т. е. меняет размер, структуру, температуру, скорость, положение в пространстве и т. д. – на шкале времени, не превышающей длительность человеческой жизни.

Хороший пример синхронных наблюдений – наблюдения источника гамма-всплеска (GRB160625B) на сети *MASTEP* (МГУ им. М.В. Ломоносова). и на обсерватории Fermi 25 июня 2016 г. На рисунке черным цветом показаны G1 – предвестник, G2 – основной импульс, G3 – повторный импульс. Синим и голубым показаны оптические наблюдения двух роботизированных телескопов *MASTEP* на Канарских островах и в Крымской обсерватории МГУ.

Наземные телескопы в ряде случаев предоставляют прекрасную возможность провести тестирование научных приборов, предназначенных для использования в составе космических обсерваторий. В качестве примера опишем, как функционирование системы датчиков гига (СДГ) космической обсерватории «Спектр-УФ» тестировалось с помощью наземных телескопов. Для проверки функционирования СДГ выбирались следующие площадки:



Наблюдения источника гамма-всплеска (GRB160625B) на сети МАСТЕР (МГУ им. М.В. Ломоносова) и на обсерватории Fermi (см. в тексте). Источник (источник: материал «Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР открыла поляризацию собственного оптического излучения гамма-всплесков» https://www.msu.ru/science/main_themes/globalnaya-set-teleskopov-robotov-master-otkryla-polyarizatsiyu-sobstvennogo-opticheskogo-izlucheniya.html)



Рабочие моменты и материалы разработки системы датчиков гида (СДГ) космической обсерватории «Спектр-УФ»: а – сотрудники ИНАСАН и ИКИ РАН близ телескопа Цейсс-2000 Терскольской обсерватории, на котором проводились тестовые наблюдения, б – фото площадки ASCC103, в – тот же участок в МАСТЕР-каталоге проекта «Спектр-УФ», г – изображение звезды 17^m , полученное с экспозицией 1 с, д – фотометрическая модель этого изображения (источник: из архива проекта «Спектр-УФ»)

- с разной плотностью звезд (полюс Галактики, Млечный путь, рассеянное звездное скопление, вблизи шарового скопления);

- вблизи очень яркой звезды;

Для сравнения характеристик разных макетов (вариантов) СДГ проводились наблюдения одной и той же области ASCC103 с достаточно высокой плотностью звезд. На рисунке показаны рабочие моменты и материалы этого сравнения.

Приведем также пример астрометрической (баллистической) поддержки космических миссий наземными оптическими телескопами. Телескопы

РТТ-150 и АЗТ-33ВМ выполняют высокоточный астрометрический мониторинг космического аппарата «Спектр-РГ». Типичная точность 0.1 и 0.3 угловых секунды соответственно – весьма высокая. Разница обусловлена разным фокусным расстоянием телескопов.

Хотелось бы надеяться, что читателям после прочтения этой статьи стал ясен ответ на вопрос, поставленный в ее заголовке. Ответ простой – нужно заменить разделительный союз «или» на соединительный союз «и», а вместо вопросительного знака поставить восклицательный!

ПУЛКОВСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ — ВОКРУГ РЕФРАКТОРА



КИЯЕВА Ольга Вениаминовна,

кандидат физико-математических наук



ИЗМАЙЛОВ Игорь Саматович,

кандидат физико-математических наук



СОБОЛЕВА Татьяна Владиславовна,

ШАХТ Наталия Андреевна,

доктор физико-математических наук

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН



DOI: 10.7868/S0044394822010066

НОВОЕ НЕ РОЖДАЕТСЯ НА ПУСТОМ МЕСТЕ

Герой нашей статьи – 26-дюймовый рефрактор, самый большой линзовый телескоп в Европе, который продолжает успешно наблюдать в Пулковской обсерватории. Однако история данного телескопа началась задолго до его рождения.

По указу императора Николая I в 1839 г. основана Главная астрономическая обсерватория России. Для обсерватории около столицы (19 верст) место было выбрано удачно: на горе, к югу от Санкт-Петербурга, и разрастающийся город не должен существенно мешать наблюдениям – обсерватория северная (широта 60°),



26-дюймовый рефрактор. У телескопа – А.Н. Дейч. [1960-е]. Архив ГАО РАН (далее АГАО). Ф. 12. Д. 395. Л. 4

и большинство наблюдаемых объектов находится на юге.

На должность директора обсерватории из Дерпта (ныне Тарту в Эстонии)



Панорама Главного здания Пулковской обсерватории. Вид с юга. В средней башне находился 15-дюймовый рефрактор, в западной (левой) башне – нормальный астрограф, в восточной – Бредихинский короткофокусный астрограф. Между башнями – меридианные залы с раздвижными стенами. В них – большой пассажный инструмент, вертикальный круг и меридианный круг. В пристройке, вытянутой к югу – пассажный инструмент в первом вертикале. 1935 г. АГАО. Ф. 4. Д. 105. Л. 2

был приглашен выдающийся ученый – филолог, астроном и геодезист – Фридрих Георг Вильгельм (по-русски Василий Яковлевич) Струве. Главная задача, которая стояла перед Пулковской обсерваторией – создание высокоточных звездных каталогов. За это Пулково позднее стали называть «астрономической столицей мира».

Вторая важная задача, которую поставил император – измерить нашу большую страну геодезическими методами. В.Я. Струве стал участником и руководителем с российской стороны крупнейшей международной экспедиции по измерению дуги меридиана от Скандинавии до Черного моря. Это предприятие длилось почти 40 лет, с 1816 по 1855 г. От Пулковского меридиана велись измерения долгот в России с 1844 по 1884 г., когда был принят за международный нуль-пункт Гринвичский меридиан.

Еще в Дерпте В.Я. Струве был увлечен звездной астрономией. Больше всего его интересовали двойные звезды. В 1837 г. он опубликовал каталог 2714-ти двойных звезд. До сих пор наблюдения Струве являются маяками для исследователей, изучающих эти объекты.

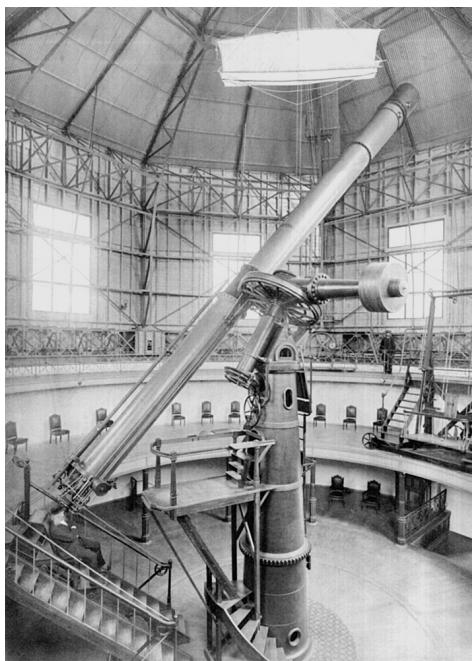
Несколько слов о том, что такое двойные звезды. Их впервые открыл в XVIII в. знаменитый английский астроном Уильям Гершель. Он заметил, что некоторые соседние звезды со временем изменяют положение относительно друг друга. Среди них есть те, которые не только на небе, но и в пространстве находятся достаточно близко друг от друга, чтобы между ними возникло взаимодействие по закону Всемирного тяготения. Тогда они обращаются вокруг общего центра масс по эллиптическим орбитам. Если пронаблюдать весь путь двойной звезды по своей орбите, то можно вычислить массы звезд. Но орбитальные периоды многих визуально-двойных звезд – сотни и тысячи лет. Поэтому в настоящее время менее всего изучены медленно движущиеся пары, и их исследование продолжает быть актуальным.

Для наблюдения таких звезд необходим длиннофокусный телескоп, чтобы изучать маленький участок неба в крупном масштабе. Также длиннофокусный телескоп необходим для наблюдений спутников планет Солнечной системы и для определения расстояний до ближайших звезд. А как раз в 1837 г., еще в Дерпте, В.Я. Стру-



15-ти дюймовый рефрактор Мерца и Малера. [1869]. АГАО. Ф. 4. Д. 105. Л. 7 об.

ве впервые в мире определил расстояние до Веги, одной из самых ярких звезд Северного полушария. Поэтому неудивительно, что сразу, в 1839 г.,



30-дюймовый рефрактор. У телескопа сидит О.В. Струве. [1889]. АГАО. Ф. 4. Д. 108. Л. 11

среди первых телескопов в обсерватории был установлен лучший в то время 15-дюймовый рефрактор Мерца и Малера с фокусным расстоянием 7 метров и диаметром объектива 38 см (1 дюйм = 2.54 см), на котором Отто Струве, сын Василия Яковлевича, открыл 547 двойных звезд.

О.В. Струве, возглавив Пулковскую обсерваторию в 1862 г., продолжал наблюдать двойные звезды и добился того, что при поддержке правительства в 1885 г. в обсерватории появился самый круп-

ный телескоп того времени – рефрактор с диаметром объектива 30 дюймов (или 76 см) и фокусным расстоянием 14 м. Объектив был изготовлен в Америке знаменитым оптиком А. Кларком. И уже сын О.В. Струве, Герман, продолжал дело отца и деда.

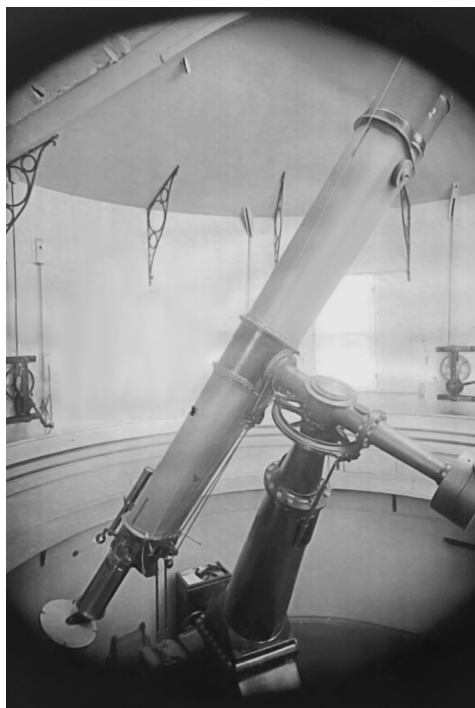
Таким образом, наблюдения на длиннофокусном рефракторе двойных звезд и планет Солнечной системы – традиционная тема Пулковской обсерватории с момента ее открытия.

В 1893 г. Обсерватория приобрела нормальный астрограф (диаметр объектива 33 см, фокусное расстояние 3.5 м), изготовленный в Париже братьями Анри. С этого момента началась эра фотографических наблюдений в Пулкове, инициатором которых был Сергей Константинович Костинский. В отличие от длиннофокусного телескопа, нормальный астрограф позволяет фотографировать слабые объекты, занимающие более обширную площадь на небе. Сравнение фотопластинок, полученных в разное время, позволяет вычислить собственное движение звезд – это необходимый материал для изучения

строения нашей Галактики. После смерти С.К. Костинского работы по фотографической астрометрии возглавил его ученик Александр Николаевич Дейч.

С 1880-х гг. стала развиваться новая отрасль астрономии – астрофизика, одним из пионеров которой был Аристарх Аполлонович Белопольский. При помощи спектрографа, установленного на 30-дюймовом рефракторе, он получал спектры звезд и их лучевые скорости в соответствии с эффектом Доплера. В частности, он открыл спектральную двойственность яркой звезды Кастор В в созвездии Близнецов.

Регулярные позиционные наблюдения относительных координат двойных звезд в плоскости неба на 15-дюймовом рефракторе возобновились в 1926 г. по инициативе Николая Васильевича Комендантова. В 1935 г. Иннокентий Андреевич Балановский возобновил и на 30-дюймовом рефракторе эти наблюдения, используя



Нормальный астрограф. 1920-е гг. АГАО. Ф. 4. Д. 108. Л. 8 об.



Е.Я. Перепёлкин, А.Н. Дейч, С.К. Костинский в Астрофизической лаборатории Пулковской обсерватории. [1920-е]. АГАО. Ф. 4. Д. 105. Л. 19 об.



А.А. Белопольский у 30-дюймового рефрактора с трехпризменным спектрографом. [1890-е]. АГАО. Ф. 4. Д. 105. Л. 10

дифракционную решетку, которая позволяет ослабить более яркую звезду и повысить точность измерения звезд разного блеска. К сожалению, эта работа была прервана. Оба астронома были арестованы 7 ноября 1936 г. по так называемому «пулковскому делу» и приговорены к 10 годам заключения. Дальнейшая судьба их не установлена¹.

К 100-летию обсерватории на Государственном оптико-механическом заводе (ГОМЗ, ныне ЛОМО) планировали создать 32-дюймовый рефрактор. Под руководством Дмитрия Дмитриевича МаксUTOва перед войной был изготовлен объектив, но ему так и не удалось увидеть небо. Вместе с объективами своих предшественников он находится в Астрономическом музее Пулковской обсерватории.

¹ См. <http://old.ihst.ru/projects/sohist/document/pulkovo.htm>

ВОЙНА

Если пишешь о Пулковской обсерватории, невозможно обойти тему Великой Отечественной войны. В 1941 г. столетние ряды наблюдений были прерваны. Около 50 сотрудников ушли защищать родину. К 1945 г. Обсерватория потеряла треть своего личного состава. В Пулковском мартирологе жертв войны и блокады значатся 53 человека.

В начале июля 1941 г. враг стремительно приближался к Ленинграду с юга. По приказу директора С.И. Белявского прекратились наблюдения. С 10 июля начался и в августе завершился демонтаж зенит-телескопа, нормального астрографа, большого пассажного инструмента, вертикального круга и меридианного круга. С больших рефракторов (15- и 30-дюймовых) сняли объективы. Это оборудование было упаковано и вывезено в Ленинград. В годы войны оно хранилось в подвалах здания Академии наук на Васильевском острове. С помощью бойцов Красной Армии удалось вывезти также часть портретной галереи, архив и часть фонда библиотеки.

В августе группа астрофизиков уехала в Алма-Ату для наблюдения полного солнечного затмения 21 сентября 1941 г. Остальные сотрудники покинули свои пулковские квартиры и поселились в Ленинграде. Директор С.И. Белявский в сентябре 1941 г. вылетел в Ташкентскую астрономическую обсерваторию, которая была определена основным местом эвакуации Пулковской обсерватории.

Исполняющим обязанности директора ГАО в Ленинграде остался А.Н. Дейч. На его долю выпал период руководства Обсерваторией в самую тяжелую блокадную зиму 1941–1942 гг. В сентябре он успел организовать



Руины Главного здания и башни 30-дюймового рефрактора. Вид с юга. [1945]. АГАО. Ф. 4. Д. 106. Л. 3

спасение результатов многолетних наблюдений (фотопластинок) и самых ценных книг из научной библиотеки. Выжившие сотрудники выехали в Ташкент только 20 февраля 1942 г.

В сентябре Пулковские высоты стали стратегическим узлом обороны Ленинграда. На территории обсерватории начали размещаться воинские подразделения. В подвалах Главного здания находились командные пункты подразделений. Впервые Пулково бомбили 12 сентября. Особенно ожесточенные бои развернулись 23 сентября. К октябрю 1941 г. Обсерватория превратилась в руины. Погибли крупные телескопы и их павильоны (15- и 30-дюймовые рефракторы, пассажный инструмент в первом вертикале, горизонтальный солнечный телескоп, дифракционный телеспектрограф), погибли три четверти библиотеки, музей астрономических инструментов, старинный парк и личное имущество сотрудников.

Но линию фронта удалось удержать южнее Обсерватории до полного снятия блокады в 1944 г. На Пулковские высоты, с которых Ленинград виден как на ладони, фашисты не поднялись!

В сентябре 1943 г. в Москве состоялось Общесоюзное астрономическое совещание, на котором было принято единодушное решение о необходимости воссоздания Обсерватории на прежнем месте вблизи Ленинграда.

Первые пулковцы вернулись в Ленинград сразу после снятия блокады, в феврале 1944 г. А уже 8 марта в разрушенное Пулково приехали директор Г.Н. Неуймин, астроном Н.Н. Павлов и зам. директора по административно-хозяйственной части В.К. Морфорд.

19 мая 1944 г. вышло Постановление Совнаркома о восстановлении и реконструкции ГАО в Пулкове. А 11 марта 1945 г. Постановлением СНК СССР были определены конкретные меры по реконструкции ГАО, в частности, установлены границы защитной парковой зоны в радиусе 3 км вокруг Обсерватории (сейчас эти границы грубо нарушаются).

В июне 1945 г. территория ГАО была полностью разминирована (хотя и по сей день в Пулкове находят снаряды военного времени). Автором проекта восстановления и реконструкции Пулковской обсерватории стал архи-

тектор А.В. Щусев. Было предложено восстановить Главное здание в прежнем объеме, сохранив внешний облик, созданный архитектором А.П. Брюловым. Причем восстановить на прежних фундаментах, которые, что важно, уцелели, и реконструировать здание в свете требований современной науки и техники.

21 мая 1954 г. в Пулкове состоялось торжественное открытие восстановленной обсерватории. Но 26-дюймовый рефрактор в этих торжествах не участвовал. Он начал работать через три года.

НОВЫЙ РЕФРАКТОР В ПУЛКОВЕ

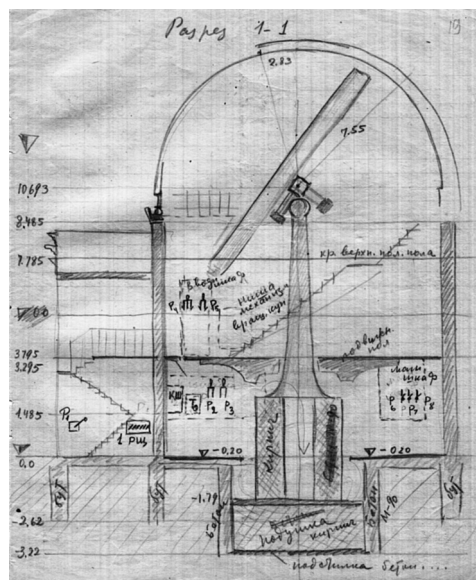
Восстанавливать старый 30-дюймовый и изготавливать 32-дюймовый рефрактор не стали, т. к. в Пулковской обсерватории появился новый цейсовский 26-дюймовый с диаметром объектива 65 см и фокусным расстоянием 10.4 м. Оглянемся на его исто-

рию, которую описали Н.Г. Птицына и А. Альтаморе в статье, опубликованной в итальянском Астрономическом журнале (*Giornale di Astronomia*, 2016, № 2).

В 1938 г. в Италию прибыл Гитлер, который объявил, что дарит итальянскому народу в лице Муссолини астрономическое оборудование для обсерватории, которое будет изготовлено на заводе Цейса в Йене. Список включал: 26-дюймовый рефрактор и 15-метровый купол для него с подъемным полом и соответствующим электрооборудованием; двойной 16-дюймовый астрограф; 49-дюймовый рефлектор новой конструкции с широким полем зрения. Для подарка Гитлера вскоре в местечке Монте Порцио Катоне началось строительство новой национальной обсерватории. Купола для башен телескопов были изготовлены фирмой «Карл Цейс» в 1942 г. Немецкие специалисты смонтировали их в новой итальянской обсерватории летом 1943 г. Но именно в это время Муссолини был отстранен от власти. Германия захватила контроль над Римом и северной Италией. И уже в конце 1943 г. немцы вывезли купола в Германию.

Почти все телескопы и вспомогательное оборудование были готовы к началу 1944 г. Но из-за изменившейся военно-политической ситуации их перераспределили между немецкими обсерваториями. В частности, 15-метровый купол большого рефрактора отправился в Институт им. Фраунгофера. Большие телескопы оставались на заводе Цейса до 1945 г.

После окончания войны встал вопрос о возмещении ущерба советским обсерваториям. Группа астрономов, командированных в 1945 г. в Германию, изъехала по правилам репарации ряд телескопов. Петр Павлович Добровин, участник этой командировки,



Разрез башни 26-дюймового рефрактора.
Рис. А.Н. Дейча. 1945 г. АГАО. Ф. 10. Д. 91. Л. 19

вспоминал, что на заводе Цейса он обнаружил четыре телескопа, которые, как ему сказали, были предназначены для обсерватории Муссолини: 26-дюймовый рефрактор, двойной 16-дюймовый астрограф, метровый телескоп Шмидта и коронограф Лео. Эти «телескопы Муссолини» и вывезли с завода Цейса в СССР. Двойной 16-дюймовый астрограф получила строящаяся Крымская обсерватория, метровый телескоп системы Шмидта – Бюраканская, коронограф Лео позднее был установлен на Горной станции ГАО под Кисловодском. Для Пулковской обсерватории предназначался 26-ти дюймовый рефрактор.

В ноябре 1945 г. А.Н. Дейч составил техническое задание на башню большого рефрактора. Сам рефрактор, вернее, ящики с его частями, прибыл в Пулково 17 сентября 1947 г. В 1948–1949 гг. получены части подъемного пола, который мог поднимать и опускать наблюдателей в зависимости от положения телескопа. Прилагались и чертежи фирмы «Карл Цейс» на немецком языке. Интересно, что чертежи деталей купола башни были сделаны в апреле 1946 г. уже для Пулковской обсерватории.

Ящики с демонтированным инструментом и полом стояли сначала на площадке под открытым небом, а затем их разместили в деревянном сарае. В 1950 г. в Пулкове построили каменный склад, куда перевезли все ящики. Там бригада завода ГОМЗ провела осмотр и профилактический ремонт частей телескопа и подъемного пола.

Строительство башни для рефрактора, как описывал А.Н. Дейч в своей статье 1964 г., началось только в 1950 г. Вращающийся купол изготовили в Ленинграде по цейсовским чертежам. В 1951 г. установили колонну



Монтаж купола башни 26-дюймового рефрактора. [1953]. АГАО. Ф. 10. Д. 91. Л. 26

рефрактора. В 1952–1953 гг. изготовили круг катания купола диаметром 15 м. Подъемный пол смонтировали в январе 1953 г. В 1954 г. купол подняли на башню, и тогда стало возможным приступить к установке инструмента на колонну. К октябрю 1954 г. эту работу завершили. Затянулись на несколько лет электромонтажные работы. И только летом 1957 г. башню и инструмент окончательно приняли в эксплуатацию. Но подъемный пол работал ненадежно, поэтому в 1961 г. сотрудниками Политехнического института была разработана новая система электропривода.



Башня 26-дюймового рефрактора. В открытой щели виден телескоп. Съемка А.А. Михайлова. Конец 1950-х гг. АГАО. Ф. 4. Д. 106. Л. 1 об.

НАЧАЛО НАБЛЮДЕНИЙ

Первоначально телескоп предназначался для визуальных микрометрических наблюдений, но в Пулковской обсерватории сразу начались фотографические наблюдения. Для этого была изготовлена новая кассетная часть.

Пробные наблюдения 1957–1958 гг. позволили выявить недостатки телескопа, и А.Н. Дейч поручил руководство телескопом и его доработку Ивану Ивановичу Канаеву.

В 1959 г. рефрактор разобрали для ремонта некоторых узлов.

Были переделаны зажимы трубы, установлен новый часовой механизм. Появилась возможность исследовать объектив в лабораторных условиях с целью изучения главных **аббераций** объектива: **сферической** (искажения, происходящие из-за несовпадения фокусов для лучей света, проходящих на разных расстояниях от оптической оси), **хроматической** (искажения изображения объекта, когда лучи от разных длин волн сходятся в разных точках) и **астигматизма**

(искажения, при которых изображение точки, находящейся вне оптической оси и образуемой узким пучком лучей, представляет собой не круглое пятно рассеяния, а два отрезка прямой). Анализ показал, что, хотя объектив 26-дюймового рефрактора уступает по качеству оптики 30-дюймовому пулковскому рефрактору и нормальному астрографу, его объектив признан качественным и пригодным для высокоточных астрометрических работ, если использовать диафрагмирование объектива до 550 мм (при общем диа-

метре 650 мм). В дальнейшем это правило соблюдалось.

По схеме И.И. Канаева была изготовлена и протестирована новая автоматизированная кассета. Для увеличения точности получаемых положений, при наблюдениях на 26-дюймовом рефракторе, как правило, делается несколько изображений объекта. Чтобы получить качественный ряд таких изображений, гораздо надежнее иметь дело с движущейся кассетой, а не с передвижением трубы. Старая кассетная часть передвигалась только по одной координате. Новая кассета двигалась по двум направлениям и управлялась с пульта наблюдателя. В дальнейшем Александр Иванович Шахт с коллегами усовершенствовал и эту кассету. Третья кассета была снабжена автоматическим затвором. Постоянное присутствие наблюдателя у пульта не требовалось. Достаточно было для каждой звезды задать длительность и число экспозиций. Это существенно облегчило труд наблюдателя.

Регулярные наблюдения начались в 1960 г. Часовой механизм, компенсирующий вращение

Земли, позволяет удерживать изображение неподвижным в течение 30 минут, поэтому программа наблюдений составлена так, чтобы за это время можно было бы завершить наблюдение на одной пластинке без гидирования.

И.И. Канаев заведовал инструментом до 1970 г., затем руководство рефрактором перешло к Алексею Алексеевичу Киселёву, который и ранее активно работал и осуществлял свои программы. Следует заметить, что инструмент работал без сбоев благодаря неусыпному контролю за его состоя-



И.И. Канаев. 2007.
Личный архив Н.А. Шахт

нием со стороны как Ивана Ивановича, так и Алексея Алексеевича, которые часто исправляли неполадки еще до прихода инженеров и техников.

С самого начала наблюдений на рефракторе стояла задача определения расстояний до звезд. Если наблюдать звезду в течение нескольких лет из противоположных точек земной орбиты, то по изменению ее координат можно вычислить угол, под которым со звезды видна орбита Земли. Этот маленький угол называется **параллакс**. Определив его, можно вычислить расстояние до звезды в астрономических единицах (среднее расстояние от Земли до Солнца).

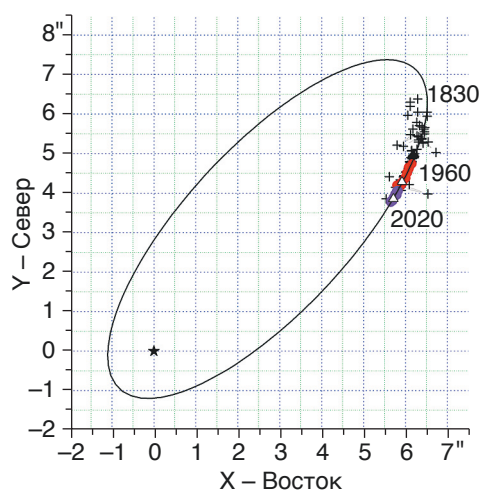
Программа определения параллаксов была разработана с учетом нашего географического положения и климатических условий. Необходимое требование – возможность наблюдений звезды на разных концах параллактического эллипса. Естественно, здесь были свои ограничения, такие как, например, северные белые ночи. С другой стороны, наша обсерватория ввиду своего северного положения предоставляла преимущество для наблюдений близполюсных звезд, которые невозможно наблюдать на юге. А.А. Киселёв пришел к выводу, что в условиях Пулковской обсерватории необходимо наблюдать параллакс в постоянном **часовом угле**, который измеряется относительно меридиана. Сейчас задачу определения параллаксов большинства звезд с высокой точностью решили космические миссии *Gipparcos* (1991 г.) и *Гайя* (2016 г.), но те параллаксы, которые были определены на рефракторе раньше, хорошо согласуются с высокоточными современными результатами, что говорит о высоком качестве наблюдений. Однако выяснилось, что есть звезды, которые представляют проблему для космических телескопов из-за их большого собственного движения и возможной



А.А. Киселёв у 26-дюймового рефрактора. Съемка А.Ф. Сухоноса. [1970-е]. АГАО. Ф. 4. Д. 164. Л. 25

двойственной природы. Для них наши параллаксы – единственные, и рассматривается возможность возобновления наблюдений таких звезд.

Став заведующим, А.А. Киселёв тщательно продумал программу наблюдений, учитывая возможности телескопа. Больше всего времени уделялось широким визуально-двойным звездам – измерялись относительные положения звезд, образующих пары. Особое внимание уделялось получению многолетних однородных рядов, чтобы исключались систематические инструментальные ошибки. Для каждой звезды подбирался сорт эмульсии фотопластины и время экспозиции, весь ряд измерял один человек на одном измеритель-



Орбита одной из двойных звезд (ADS2757) пулковской программы в проекции на плоскость неба. Орбитальный период – 1075 лет. Получена методом А.А. Киселёва на основе наблюдений 26-дюймового рефрактора 1960–2020 гг. Крестиками обозначены все разнородные наблюдения с 1830 г., красным цветом – наши фотографические, фиолетовым – наши ПЗС-наблюдения, треугольники – наши наблюдения космических телескопов Гиппаркос (1991) и Гая (2015)

ном приборе, чтобы личная систематическая ошибка также исключалась. Эти требования необходимы для того, чтобы по короткой дуге (т. е. короткой по отношению к орбите звезды), охваченной многолетними наблюдениями, можно было получить скорость относительного движения в системе двойной звезды. А.А. Киселёв в 1980 г. предложил метод определения первоначальных орбит, опираясь на короткие дуги высокоточных наблюдений. Основное достоинство такого метода заключается в том, что он использует все данные об объекте, полученные из позиционных, спектроскопических и фотометрических наблюдений, позволяет оценить согласованность этих данных между собой и качество полученной орбиты. Если полученная орбита с

периодом более 1000 лет хорошо согласуется с разнородными наблюдениями в прошедшие 200 лет, не участвующими в ее вычислении, то ее можно использовать для вычисления эфемерид (вычисленные координаты на заданные моменты времени) в будущем. Научная цель этой работы – изучение малоизученных широких двойных звезд, которые несут информацию о звездообразовании и динамической эволюции подсистем в нашей Галактике.

Третья большая программа – измерение положений спутников планет солнечной системы относительно их планеты.

Наблюдения на телескопе проводились каждую ясную ночь от зари до зари. Долгими зимними ночами наблюдатели делили ночь пополам, сменяя друг друга.

ВТОРОЕ РОЖДЕНИЕ – ТЕЛЕСКОП-РОБОТ

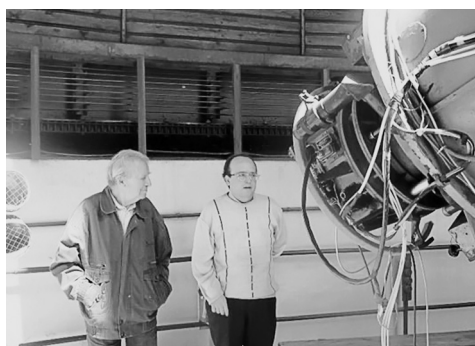
В конце XX в. весь мир как в быту, так и в науке перешел от обычной фотографии к цифровой. Из-за политических трудностей первая ПЗС-матрица появилась в Пулковской обсерватории только в 1995 г., регулярные наблюдения начались в следующем, 1996 г. Однако до 2007 г. параллельно продолжались фотографические наблюдения, чтобы иметь возможность состыковать два ряда, учитывая нарушение однородности при переходе на новый носитель информации. С этого времени руководство телескопом перешло к Игорю Саматовичу Измайлону.

Выигрыш в **разрешающей способности** телескопа при переходе на цифровой носитель иллюстрируют три фотографии на рисунке, который помещен на стр. 85.

Также очевиден выигрыш в **проницающей силе** телескопа, которая

характеризуется предельной звездной величиной самой слабой звезды, которую можно увидеть в данный инструмент при наилучших условиях наблюдений. **Видимая звездная величина (m)** – это мера яркости небесного тела с точки зрения земного наблюдателя. Она зависит от того, сколько света излучает объект, и на каком расстоянии он находится. Чем блеск звезды слабее, тем звездная величина больше. Невооруженному глазу доступны звезды, у которых $m < 6$. В 1959 г. Наталия Андреевна Шахт, будучи студенткой пятого курса Ленинградского университета, в своей дипломной работе исследовала некоторые возможности рефрактора, в том числе и проникающую силу. На высокочувствительных пластинках Kodak Oa-D при экспозиции 1 час можно было получить звезды с видимой звездной величиной до 16.5. Когда город приблизился к Обсерватории, проникающая сила заметно уменьшилась, но для ПЗС-наблюдений на нашем телескопе и сегодня доступна звездная величина 19.5.

В 2001–2003 гг. был выполнен первый этап автоматизации – наведение



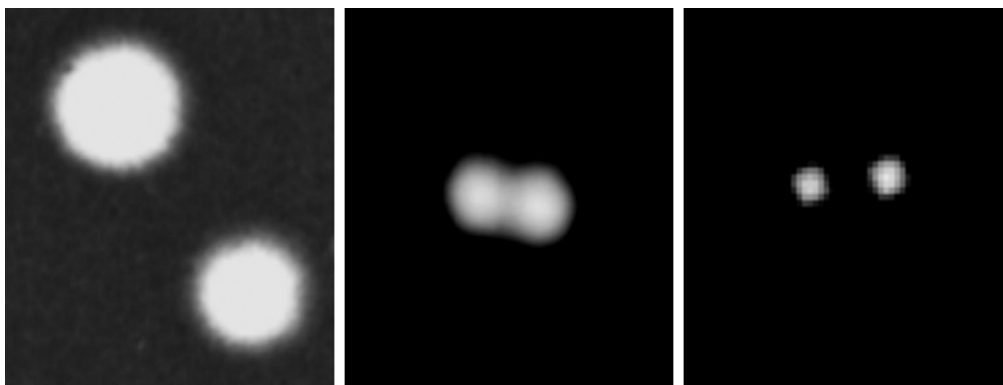
А.А. Киселёв и И.С. Измаилов около 26-дюймового рефрактора. 2011 г.
Личный архив Н.А. Шахт

телескопа на объект по координатам, и в 2003 году начались массовые наблюдения в автоматическом режиме, при этом наблюдатель находился около телескопа и контролировал работу автоматики.

В любом случае во время фотографических наблюдений наблюдатель должен был менять пластинки, т. е. присутствие наблюдателя около телескопа было необходимо. После окончательного перехода на цифровую фотографию появилась возможность полностью

Выигрыш в разрешающей способности при переходе на цифровой носитель.

Слева – фотография широкой пары с расстоянием между компонентами 28 угловых секунд, в центре – фотография звезды с расстоянием между компонентами 3 угловые секунды (предел для фотографических наблюдений), справа – та же звезда с расстоянием между компонентами 3 угловых секунды, снятая с помощью ПЗС-матрицы



автоматизировать процесс наблюдений. В 2010 г. система автоматических наблюдений была усовершенствована, и сейчас нет необходимости наблюдателю находиться в павильоне, в случае каких-либо неполадок система сама запрашивает вмешательство наблюдателя. Как правило, все затруднения удается разрешить в удаленном режиме, по сети.

Постоянно закрепленная на здании фотокамера фотографирует небо каждые 5 минут. Если фотография отождествляется с картой неба, компьютер передает команду на телескоп. Открываются створы купола и штора, защищающая объектив от пыли, и процесс пошел. Как только фотография не отождествляется, купол закрывается, чтобы защитить телескоп от возможного дождя. Ночное время определяется по рассчитанному положению Солнца. На рассвете процесс заканчивается до следующей ясной ночи.

Важно отметить, что переход к автоматическим наблюдениям не нарушил режим наблюдений: по-прежнему каждую ясную ночь проводились наблюдения, постепенно упрощая работу наблюдателя.

Также важно то, что все было выполнено сотрудниками обсерватории под руководством и при непосредственном участии Игоря Саматовича Измайлова в трудные годы без больших материальных затрат, используя выпускаемые серийно (а значит, не дорогие) компоненты компьютерной и даже бытовой техники.

При автоматических наблюдениях не теряется ни одной минуты наблюдательного времени. Если считать, что в ночь должно быть более трех часов ясной погоды, то 120–150 ночей в год не так уж мало не только для Пулковы, но и для любой обсерватории, расположенной в месте с гораздо лучшим астроклиматом.

НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Что же удалось сделать за 70 лет регулярных наблюдений? Ввиду нашего северного географического положения удалось получить уникальные ряды положений двойных звезд с координатами вблизи Северного полюса мира.

С 1960 по 2007 г. было получено более 22 000 фотопластинок, а с 2003 по 2019 г. – 37 000 ПЗС-наблюдений 400 двойных звезд, входящих в нашу программу наблюдений. Все наблюдения обработаны, опубликованы относительные положения и параметры относительного движения (положение и скорость) на средний момент наблюдений. Эти данные служат маяками для исследований медленно движущихся звезд.

Методом Киселёва определены первые орбиты 60 звезд с орбитальными периодами 1000 лет и более. Проанализирована ориентация геометрических параметров орбит в Галактике. Выявлены двойные звезды с возможными спутниками. Некоторые «предсказанные» спутники были позже подтверждены наблюдениями на современных крупных телескопах.

Всех нас больше всего интересует порядок в нашем космическом доме – Солнечной системе. В мире есть всего три центра (в России, во Франции и в Америке), которые собирают наблюдения астероидов, больших планет и их спутников, и по этим наблюдениям уточняются орбиты, необходимые для планирования космических миссий и защиты Земли от непрошенных гостей – столкновений с большими астероидами. В России эту задачу решает институт прикладной астрономии (ИПА) в Санкт-Петербурге. Качество наблюдений каждой обсерватории определяется сравнением с эфеме-

ридами уточненной орбиты. В нашей стеклотеке хранится 935 фотопластинок, снятых на 26-дюймовом рефракторе с изображениями Сатурна и Юпитера (со спутниками и без) и около 2000 пластинок с другими объектами (кометы, астероиды, шаровые и рассеянные скопления, Луна, Марс, Венера). Сейчас ПЗС-наблюдения планет продолжают.

И по количеству наблюдений, и по их качеству, Пулковская обсерватория занимает одно из ведущих мест в мире. Объективные доказательства приведены в статье старшего научного сотрудника ИПА Э.И. Ягудиной в газете *Троицкий вариант* (2017 г., № 3)².

Уместно вспомнить слова из выступления д-ра Арло (Jean-Eudes Arlot, Парижская обсерватория) «**The astrometry of solar system objects after Gaia**» на Генеральной Ассамблее МАС в 2015 г., при рассмотрении движения спутника Сатурна Мимаса, о том, что для исследования «Долговременный период наблюдений может быть предпочтительней, чем короткий период, даже если последний получен с большей точностью».

Уникальность пулковских наблюдений не в их точности (космические телескопы наблюдают на два порядка точнее), а в длительности и однородности многолетнего ряда, освобожденного от систематических инструментальных ошибок. Каждое наблюдение, увеличивающее общую цепочку, неповторимо. Бессмысленно переносить



Группа пулковских астрофотографов у навильона 26-дюймового рефрактора (слева направо): О.А. Калиниченко, Л.Г. Романенко, С.В. Толбин, Н.А. Шахт, В.С. Чубей, А.А. Киселёв, Т.П. Киселёва, О.П. Быков, И.И. Брейдо, Н.М. Бронникова. Съёмка А.Ф. Сухоноса. Сентябрь 1990 г. АГАО. Ф. 4. Д. 165. Л. 19

телескоп на новое место, ведь система будет уже другая.

Программный пакет «IZMCCD», созданный для обработки наблюдений, полученных на 26-дюймовом рефракторе, находится в открытом доступе и широко используется в ряде обсерваторий для выполнения научных работ, связанных с обработкой цифровых изображений. Также в некоторых университетах и институтах этот пакет используется преподавателями и студентами в учебных целях для выполнения лабораторных и практических работ. Полученный опыт при автоматизации такого непростого в техническом отношении инструмента, как 26-дюймовый рефрактор, в дальнейшем, несомненно, будет использоваться для модернизации других современных телескопов, принадлежащих различным обсерваториям.

В 2017 г. встал вопрос о прекращении наблюдений в Пулковской обсерва-

² <https://trv-science.ru/2017/03/astrometricheskie-nablyudeniya-v-pulkovskoj-observatorii-i-ikh-znachenie>

тории. Хуже всего то, что возник он не из научных соображений, а из-за коммерческих интересов лиц, не имеющих никакого отношения к наблюдательной астрономии. В результате комиссия РАН приняла решение о переносе наблюдений на юг в течение 5 лет. Можно построить новые телескопы и начать новые наблюдения, если будут деньги, но продолжить хорошо налаженную работу без потерь на новом месте не удастся, да это и бессмысленно.

В XXI в. исполнилась мечта астрономов избавиться от влияния атмосферы. Точность космических астрометрических наблюдений, реализованных в каталоге Гайя (версия 2018 г.), в случайном отношении выше всех производящихся на Земле. Многие специалисты считают, что со временем потребность в наземных наблюдениях сведется лишь к поддержке космических миссий.

Мы не можем сейчас сказать, сколько времени наш телескоп сможет выполнять качественные наблюдения. Конечно, уже построенные дома, окружающие обсерваторию с юга, никто сносить не будет, и люди, которые там живут, не виноваты. Скорее всего, от каких-то наблюдений придется отказаться. Но не надо ставить ограничения. Пусть телескоп работает до тех пор, пока его наблюдения полезны.

Сейчас, когда ведутся постоянные наблюдения Солнца из космоса, нет необходимости запускать для этого стратосферную станцию, а в 1973 г. это было актуально. Также бессмысленно будет продолжать наши наблюдения, когда появятся многолетние однородные ряды высокоточных космических наблюдений звезд. Тогда наш старый телескоп сможет помогать в обучении новых поколений астрономов.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
НАУКА
1727**
naukapublishers.ru

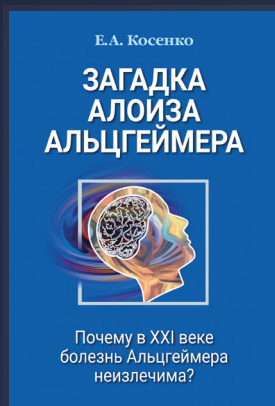
ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ ПЕРЕПЛЕТ

Рисунок на коже
Все виды тиснения
Кожаный переплет
Рельефное тиснение
Клише любой сложности
Полноцветная роспись обзоров
А также адресные папки, дипломы, футляры

Берёмся за работы любой сложности!
По всем интересующим вопросам пишите на почту kiseleva@tnauka.ru

реклама

С новыми книгами
Издательства “Наука”
вы можете ознакомиться на сайте
naukabooks.ru



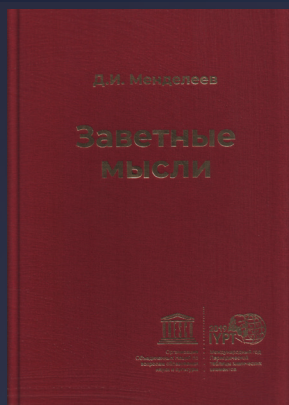
Косенко Е.А.

Загадка Алоиза Альцгеймера. Почему в XXI в. болезнь Альцгеймера неизлечима?

М.: Наука, 2019. — 319 с.

В монографии изложена актуальнейшая на сегодняшний день медико-биологическая проблема, связанная с болезнью Альцгеймера (БА), и предпринята попытка ответить на вопрос: почему заболевание, известное с начала XX в. и на изучение которого тратятся триллионы долларов, в настоящее время все еще остается неизлечимым, а имеющиеся антиамилоидные препараты приносят больше вреда, чем пользы? Для объяснения механизмов, лежащих в основе нейродегенерации при БА, формулируется «эритроцитарная гипотеза», согласно которой эритроциты рассматриваются не просто как клетки, переносящие кислород, а как клетки, от эндогенного метаболизма которых зависит адекватная доставка кислорода в ткани, и в частности в мозг. Именно функциональное несоответствие между эритроцитами и биоэнергетикой мозга, считает автор, лежит в основе гибели нейронов.

Книга может быть интересна широкому кругу читателей – студентам, обучающимся по специальностям «биология», «биомедицина», а также физиологам, биохимикам научно-исследовательских лабораторий, преподавателям высших образовательных медицинских и биологических учреждений.



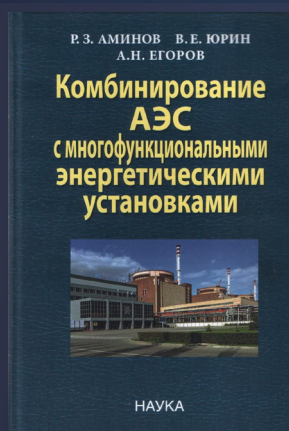
Менделеев Д.И.

Заветные мысли.

М.: Наука, 2019. — 310 с.

Д.И. Менделеев в работе «Заветные мысли» рассуждает о желательных, на его взгляд, путях развития России в геополитической, экономической и научной областях. Круг анализируемых ученым вопросов чрезвычайно широк: государственное устройство, образование, народонаселение, внешняя торговля, взаимосвязь между просвещением и национальным богатством, баланс между промышленностью и сельским хозяйством и т.д. По существу, «Заветные мысли» – духовное завещание Д.И. Менделеева потомкам.

Для широкого круга читателей.



Аминов Р.З., Юрин В.Е., Егоров А.Н.

Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками.

М.: Наука, 2018. — 238 с.

В работе предложен новый взгляд на повышение безопасности АЭС. Разработаны и исследованы многофункциональные системы, включающие такие установки, как дополнительная паровая турбина, тепловые аккумуляторы, водородный комплекс и газотурбинные установки, позволяющие обеспечить надежное электроснабжение собственных нужд АЭС в аварийных ситуациях с обесточиванием. Исследован способ использования остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР для генерации электроэнергии, необходимой для отвода остаточного тепловыделения в аварийных ситуациях с полным обесточиванием. Разработана система уравнений и построены скелетные таблицы свойств диссоциированного водяного пара, которые позволяют проводить промышленные термодинамические расчеты параметров рабочего тела водородных циклов. Исследованы процессы сжигания водорода в кислородной среде, а также определены ресурсные показатели основного оборудования водородного энергокомплекса, работающего в циклических режимах.

Для научных работников, специалистов, аспирантов, студентов старших курсов теплоэнергетических специальностей.

naukabooks.ru

Я ВЕЧНО К ВАМ ИДУ... (К 125-летию А.Л. Чижевского)

ГУРФИНКЕЛЬ Юрий Ильич,

доктор медицинских наук

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

DOI: 10.7868/50044394822010078

Александр Леонидович Чижевский – ученый, биофизик, один из основоположников космического естествознания. В феврале 2022 года отмечается 125 лет со дня его рождения. Его имя широко известно в России благодаря открытию им влияния ионизированного воздуха на организм человека и созданию так называемой «люстры Чижевского». Чижевский сделал ряд открытий, впервые опубликовав результаты своих огромных по собранному материалу исследований о периодически возникающей активности Солнца и ее влиянии на поведение человеческого сообщества. Он также исследовал пространственную организацию структурных элементов движущейся крови. В 1939 года он был номинирован на Нобелевскую премию. В сентябре 1939 года в Нью-Йорке состоялся Первый Международный конгресс по биологической физике и биологической космологии. В Меморандуме конгресса выдающиеся ученые того времени – А. д’Арсонваль, П. Ланжевен, Л. Борайль и др. – сравнили Чижевского с Леонардо да Винчи, оценив таким образом его многогранность и высокую научную продуктивность.

Впервые имя Чижевский я услышал в доме Куниных, известном в 70-х годах в московских литературных кругах. Относилось оно к висевшей на стене, местами выцветшей акварели на плотной бумаге. Там охристыми красками

была изображена карагиндинская степь с холмом на переднем плане, напоминающая марсианский пейзаж. Хозяева объяснили мне, что это одна из многих живописных работ, принадлежащих кисти ученого-биофизика, художника и поэта, отправленного в сталинские времена в ссылку в те самые края.

Второй раз об А.Л. Чижевском я услышал от Анастасии Ивановны Цветаевой, сестры Марины Ивановны, всколыхнувшей в 70-е годы своей книгой «Воспоминания» всю читающую Москву. В те годы я работал в отделении реанимации городской больницы, которая располагалась в Сверчковом переулке, неподалеку от Чистопрудного бульвара. Как-то я сказал А.И., что пытаюсь понять, почему в иные дни поступает неожиданно много больных с острой сердечной и церебральной патологией. Иногда это происходит при резких колебаниях атмосферного давления, но чаще случается по непонятной причине. По-видимому, существует еще какой-то неизвестный мне фактор. Анастасия Ивановна посоветовала познакомиться с работами А.Л. Чижевского. А через некоторое время передала мне сборник научных статей, озаглавленный «Солнце, Электричество, Жизнь», опубликованный в 1972 году, с дарственной надписью, сделанной его вдовой – Ниной Вадимовной Чижевской-Энгельгардт. Удивили пометки,

оставленные рукой Анастасии Ивановны. На полях книги попадались и знаки вопроса, вероятно, там, где ей не доставало знаний, чтобы разобраться в той или иной проблеме детально.

Так неожиданно для меня сплелись два этих имени – А.Л. Чижевского и А.И. Цветаевой. Их судьбы оказались удивительно схожи. Они родились в последнем десятилетии XIX века с разницей в три года. Анастасия – в 1894-м, Александр в 1897-м. Оба рано осиротели. Мать Чижевского так же, как и мать сестер Цветаевых, умерла от туберкулеза. Оба получили разностороннее образование, свободно владели европейскими языками.

В 1915 году опубликован сборник стихотворений и переводов Александра Чижевского. Но главная книга его жизни впереди. Еще только пишется, еще только собираются воедино факты, которым предстоит стать впоследствии волнующими страницами, и шаг за шагом нам, его потомкам, будет открываться процесс формирования этой удивительной многогранной личности.

«...Отчего я обратился к Солнцу – сказать сейчас трудно... астрономией я стал пылко интересоваться еще в 1906 году, то есть девяти лет от роду», – писал он в автобиографической повести «Вся жизнь».

...Ужас и очарование охватывали его. И неодолимое желание вновь и вновь прикасаться к холодному металлу телескопа, подаренного ему отцом, открывшего мир, где сверкают разными оттенками небесные светила. Далекая, приближенная линзами бездна ночного неба захватывала его до головокружения. Красноватый Марс, Юпитер, напоминающий выточенный из драгоценного слоистого минерала шар, безупречные кольца Сатурна. Нацелив телескоп на Луну, он подолгу разглядывал ее мертвенный ландшафт, острый ре-

льеф гор и словно циркулем очерченные кратеры, заново переживал очарование желто-зеленого лунного света. Возвращался в дом часто за полночь, с пылающими щеками, ворочался в постели, не мог уснуть.

Александр Чижевский хорошим здоровьем в детстве не отличался. Так, по крайней мере, было принято считать в семье. Нередко до такой степени он испытывал на себе влияние погоды, что мог предсказывать приближающийся дождь или грозу.

Близкие тревожились, полагая, что это может стать причиной серьезной болезни. Жизнь, однако, показала, что он сумел выдержать такие эмоциональные и физические перегрузки, какие в тех условиях люди даже крепкого здоровья не всегда были способны вынести.

Пройдет несколько лет, и Александр Чижевский сопоставит последствия высокой солнечной активности и события, происходящие в России и мире. А пока наблюдательный юноша тщательно зарисовывает увиденные в телескоп солнечные пятна, удивляясь нарастанию их количества.

И вот – первое озарение, вспышка, которая на долгие годы осветит его путь.

Александр как раз исполнилось семнадцать.

Дело происходит в начале апреля 1914 года. Ученики последнего класса Калужского реального училища неожиданно узнают, что вместо урока рисования им прочтет лекцию «*ученый, изобретатель, философ*», как его охарактеризовал директор гимназии. Щурясь от весеннего солнца, перед ними стоял несколько старомодно одетый человек с открытым лбом. Александру бросилось в глаза его сходство с поэтами и мыслителями XIX века. Необычность его появления, непонятного назначения овальные предметы, сделанные из

белого металла, свернутые чертежи... Гимназисты притихли, не понимая, что за этим последует.

Не торопясь, он выложил принесенное с собой на стол, протер роговые очки. Никто из присутствующих не догадывался, о чем будет лекция, тем более трудно было предположить, что речь пойдет о реальности полета на Луну, Марс и другие планеты.

В те годы мало кто понимал не только значение, но и суть идей К.Э. Циолковского. Учитель математики в провинциальной Калуге, глухой, странный с точки зрения обывателя, вечно поглощенный своими «абсурдными фантазиями», – кто мог тогда представить, что пройдет всего несколько десятилетий и благодаря его математическим расчетам осуществляться немислимые, воистину фантастические события: в околоземное пространство будет запущен искусственный спутник, а вскоре уже и ракета с человеком на борту покинет пределы Земли.

Ехать нужно было на окраину Калуги, спускаться к Оке по улочкам, вдоль промоин, затопленных весенними ручьями от тающего снега. Извозчик, с трудом преодолев препятствия, остановился у довольно ветхого дома с мезонином. За дверью слышно было, как хозяин спускается по скрипучей лестнице, отпирает дверь. Юноша увидел Циолковского в домашней одежде. На нем была холщовая рубашка, подвязанная ремешком. Гостя он встретил любезно и пригласил к себе, как он выразился, в светелку, на второй этаж.

Небольшая комната служила ему одновременно спальней и кабинетом. К ней примыкала мастерская с верстаком, разными столярными и слесарными инструментами. Здесь же находился токарный станок с ножным приводом.

После Чижевский довольно детально описал эту комнату с опрятно застланной кроватью, письменным столом,

заваленным книгами, и металлической моделью дирижабля на стене. Не знаю, был ли там рисунок ракеты, сделанный Циолковским. В свое время он произвел на меня сильное впечатление своей реалистичностью. Взгляд ведь задерживается на необычных деталях. Например, в одном из отсеков носовой части, по замыслу автора, космическим путешественникам надлежало принимать ванну. А сама ванна очень похожа была на ту, которая стояла у нас в коммунальной квартире, – с чугунными лапами и вычурными кранами. Соседи осеңью солили в ней огурцы.

Молодой человек учтиво представился, напомнил ученому о недавней лекции в гимназии и о приглашении посетить его. На что Циолковский сказал ему, что рад проявленному вниманию, поскольку посещениями не избалован, а его работами вообще мало кто интересуется.

Вопрос, который особенно волновал молодого человека, вначале поставил Циолковского в затруднение. В самом деле, может ли периодически возникающая активность Солнца оказывать влияние на растения, животных, на человека? Вот так гимназист! Вот они, мальчики XX века... Но ведь солнечная энергия воздействует на все объекты материального мира. Стало быть...

Циолковский ответил не сразу. Подумав, сказал:

— Было бы совершенно непонятно, если бы такого действия не существовало... Вам придется зарыться в статистику, любую статистику, касающуюся живого, и сравнить одновременность циклов на Солнце и в живом, – вспоминает Чижевский об этой встрече в своей книге «Вся жизнь».

Трубка с двумя линзами позволила Галилео Галилею в начале XVII века рассмотреть и зарисовать лунные кратеры, кольца Сатурна и спутники Юпитера. Именно Галилей впервые направил



Экслибрис, нарисованный Чижевским, изображает кору головного мозга человека, пересеченную интегралом и помещенную в солнечный ореол. Интеграл в этой символике обозначает приоритет точных математических знаний в науке о жизни

свой телескоп в сторону Солнца и обнаружил странные образования на его поверхности. Ему принадлежит фраза, впоследствии ставшая крылатой: «И на Солнце есть пятна».

В те времена за такие высказывания можно было попасть на костер. Опасаясь преследований со стороны Церкви, ученые высказывались с большой осторожностью, дабы не прослыть еретиками, подвергающимися сомнению постулат о непогрешимости божьего творения.

Чижевский с юношеским пылом берется за эту тему, едва ли представляя себе, какие перипетии судьбы его ожидают. Мог ли он тогда поверить, что времена невежества и обскурантизма, которые имели место среди европейских церковных функционеров Средневековья, повторятся в XX веке.

К началу нового столетия область знаний о деятельности Солнца быстро

расширялась. К тому времени, когда Александр, или, как его называли в семье, Шура, засел за книги, швейцарский астроном Рудольф Вольф, регулярно наблюдавший Солнце, уже установил, что длительность циклов солнечной активности составляет в среднем 11 лет. Им также были определены годы максимального и минимального количества пятен на поверхности нашего светила. Уже известны были работы английского астронома из Челси Ричарда Кэррингтона, в 1869 году увидевшего на Солнце яркую вспышку, длившуюся 5 минут. На Земле вспышке сопровождало северное сияние, достигавшее тропиков. Обычно его можно увидеть лишь за полярным кругом. Вспышка была такой мощности, что

вывела из строя линии телеграфа по всей планете.

Юный Чижевский пристально следит за новейшими научными исследованиями в этой области, запоем читает объемистые труды по астрофизике, книги Юнга, Эббота, Аррениуса.

Еще до беседы с Циолковским свое направление в науке Чижевский определил метафорически, нарисовав экслибрис, изображающий кору головного мозга человека, пересеченную интегралом и помещенную в солнечный ореол. Интеграл в этой символике должен был обозначать приоритет точных математических знаний в науке о жизни.

К совету Циолковского юный Чижевский отнесся со всей серьезностью. Мнение, высказанное ученым, подтвердило правильность его подхода, безусловно, вдохновило и послужило импульсом к практической работе.

Какой же это был огромный труд – перелопатить исторические события государств и народов, населявших континенты земного шара.

Начиная с 500 года до Рождества Христова и кончая 1914 годом, т. е. за 2414 лет, учитывались начало и высшая точка напряжения каждого массового события, имеющего более или менее крупное историческое значение. Свидетельством этой работы стали многочисленные таблицы (чудом сохранились), куда вносились данные, добытые им из книг, для последующей математической обработки. Их анализ дал ему возможность сформулировать основные результаты исследований.

И вот главный вывод, который он делает, – количество исторических событий и вовлеченность в них больших масс людей увеличиваются по мере роста солнечной активности, достигая наибольшего числа во время ее максимума. Именно в эти периоды и происходят *«величайшие революции и величайшие столкновения народов»*. Влияние вождей, ораторов, прессы растет буквально на глазах. Повышенная нервная возбудимость требует выхода. Малейший повод может стать детонатором к народному восстанию.

Теперь уже в родной Калуге в 1917 году Чижевский своими глазами мог наблюдать последствия солнечной активности. Митинги происходили повсюду. Бульвар, где обычно в тени деревьев неспешно прогуливались жители города, стал местом, где собирались разгоряченные толпы, преимущественно солдат, ораторы перебивали друг друга, не давали говорить.

Возвращаясь домой, он устанавливал во дворе телескоп, проецировал на лист бумаги солнечный диск и с удивлением наблюдал прибавляющиеся день ото дня пятна на диске светила. Их можно было зарисовать, вычислить

площадь и результаты измерений внести в блокнот. Пятнадцатый солнечный цикл стремительно развивался и к августу семнадцатого достиг своего максимума.

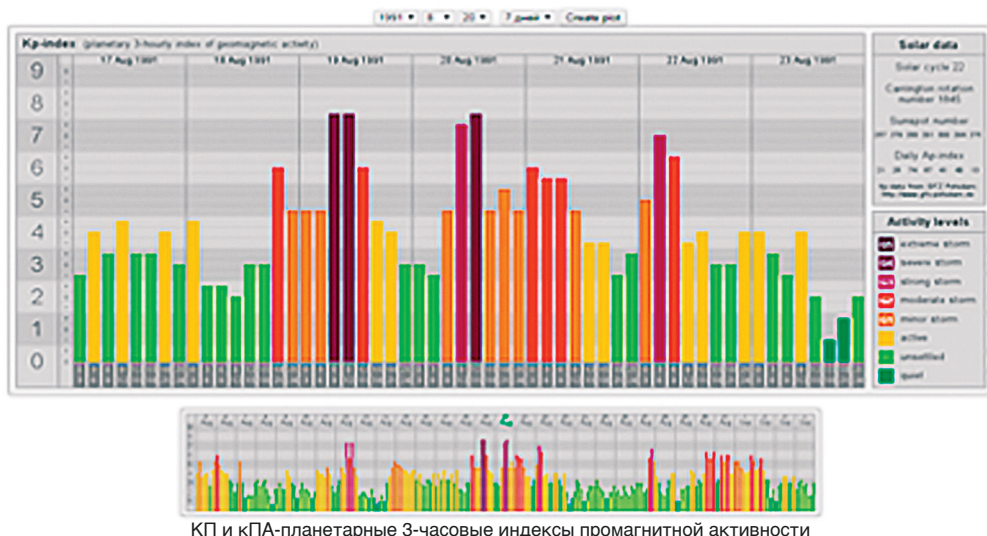
Спустя более чем 70 лет, в 1991 году, уже мы, потомки Александра Чижевского, стали свидетелями помутнения умов, имели возможность наблюдать, как день ото дня накалялась обстановка в обществе. Митинги и шествия следовали одно за другим.

На диаграмме, представленной Королевской обсерваторией Бельгии, хорошо видно, как начиная с июля и весь август 1991 года на фоне максимума солнечной активности магнитные бури сменяют одна другую. И в это же время кипение страстей достигает своего апогея. Уже в наше время толпа с ревом сносила памятники ненавистным партийным функционерам. Немало находилось таких, кто с языческим упоением пинал недавних кумиров, которым вынужденно или по собственной воле поклонялся. Люди жаждали смены власти и готовы были отдать за это жизнь.

Но вот Солнце постепенно успокаивается, вступает в фазу спада активности и наступает иная картина: миролюбие, уступчивость, безразличие к вопросам политическим и военным. По наблюдениям Чижевского, в годы *минимальной солнечной активности* участники вчерашних бурных событий зачастую сами удивляются недавним всплескам эмоций, собственной неуравновешенности.

Стремясь опубликовать результаты своих исследований, А.Л. Чижевский с юношеским максимализмом ни о каких предосторожностях не помышлял. Хотя находились «добрые» советчики, рекомендовавшие ему сконцентрироваться на изучении влияния солнечной активности на растительный и животный мир, а не на людей...

КР-индекс и КРА-индекс архив (1858 по настоящее время)



КП и кПА-планетарные 3-часовые индексы промагнитной активности

На верхнем графике, представленном Королевской обсерваторией Бельгии, видны зарегистрированные в середине августа 1991 года три магнитные бури, идущие друг за другом с интервалом в несколько часов (каждый столбик на графике соответствует трем часам, и чем он выше, тем выше уровень магнитной обстановки. Уровень магнитной активности обозначен на графике в правом нижнем углу. Зеленый цвет соответствует спокойной магнитной обстановке, красный – магнитной буре, фиолетовый – исключительно сильной магнитной буре). Нижний график охватывает период с 5 августа по 4 сентября 1991 года. До 19 августа обсерваторией зарегистрировано 5 магнитных бурь. Порой лишь несколько часов отделяло окончание магнитной бури от начала новой.

Подобно Копернику он полагал, что научные знания, хотя и рассчитаны на все времена, но прежде всего они необходимы его современникам. Ему уже в открытую говорили, как, например, Артемий Халатов¹, партийный функционер, член коллегии Наркомата просвещения и председатель правления Госиздата: «Не надо касаться социологии и политики. Законы общественного

развития давно открыты Марксом, Энгельсом, Лениным, и Солнце здесь ни при чем. В противном случае у вас будут большие неприятности». Чижевский на это возражал: Солнце играет активную роль в биологических процессах. Игнорировать это – значит идти против научно доказанных фактов. Рекомендация Луначарского, народного комиссара просвещения, мнение академика Лазарева о публикации результатов этих исследований не были приняты во внимание.

И все же очевидным слабым местом гипотезы Чижевского оставался пока не проясненный вопрос, на который у него на тот момент не было ответа.

Между тем вопрос – ключевой: каким образом это влияние осуществляется?

¹ Артемий (Арташес) Халатов сыграл значительную роль в становлении цензуры и идеологизации советской литературы. Характерный штрих: готовая страница приветствия по случаю 20-летия творческой и общественной работы «Печать и революция» В.В. Маяковского в напечатанном журнале была по приказу Халатова вырезана из всех пяти тысяч уже сброшюрованных экземпляров журнала.

Какова физиология процесса передачи энергии возбужденного Солнца всему живому на Земле?

Да, он установил факт, открыл параллелизм деятельности двух удаленных одно от другого веществ: солнечной материи и головного мозга человека. Именно так – осторожно – Чижевский сформулировал феномен влияния солнечной активности на мозг человека. И это не скрылось от внимания въедливых оппонентов.

В 50-е годы, еще при жизни А.Л. Чижевского, начали появляться факты, подтверждающие влияние солнечной активности и магнитных полей на коллоидные системы, сходные с теми коллоидами, из которых состоят клетки нашего тела, в том числе ткани головного мозга. Открытие принадлежит профессору Джорджио Пиккарди, директору Института физической химии во Флоренции, в Италии. В соответствии с программой Международного геофизического года в разных точках земного шара группой исследователей под его руководством систематически проводились эксперименты, в которых контролировалось состояние всегда одинаково приготовленной коллоидной системы. Всего таких экспериментов было свыше 250 тысяч, и в подавляющем большинстве случаев с бесспорной очевидностью удалось установить влияние солнечных вспышек, магнитных бурь на химические процессы в коллоидных системах.

Если космические силы оказывают столь мощное воздействие на неорганические коллоиды, рассудил Пиккарди, то они равным образом должны оказывать такое же влияние на коллоиды живых организмов.

Результаты этих исследований очень воодушевили А.Л. Чижевского. Это были первые звенья доказательств, цепочки сложного механизма передачи



А.Л. Чижевский на защите докторской диссертации в Московском университете, 1918 г.

энергии Солнца клеткам, органам и тканям человека.

В Ленинград Александр Чижевский приехал с рекомендательным письмом к Ивану Петровичу Павлову. Прежде он не встречался с ним, но сразу же узнал его по портретам, которые раньше видел в газетах и журналах. Темно-синий костюм, жилет, белая манишка с темными пуговицами и небольшая бархатная бабочка с опущенными книзу концами. Нижнюю часть лица полностью скрывала белоснежная, точно сбитая из сливок борода и усы, так что о мимике можно было только догадываться. Но взгляд живой, пронизательный.

Павлов к тому времени был уже Нобелевским лауреатом, автором уникальных исследований условных рефлексов, которые принесли ему мировую славу, однако даже намек на высокомерие, как отметил Чижевский, в нем не было. После краткой беседы, надев халат, Иван Петрович предложил гостю осмотреть лаборатории.

Александр после вспоминал тяжелый запах псины всюду в помещениях,

куда они с Павловым заходили. На столах стояли деревянные станки, в которых находились подопытные собаки разных пород. Откуда-то, по-видимому, из операционной, по всему зданию разносился жалобный вой...

Когда они вновь оказались в кабинете Павлова, Чижевский, набравшись смелости, рассказал ему вкратце о Циолковском и вопросах, на которые он хотел бы получить ответы. И прежде всего на вопрос о том, насколько может быть опасно для человека чрезмерное ускорение в момент разгона ракеты до космической скорости, а также последующая за этим невесомость.

Павлов никаких особых соображений по этому поводу не высказал, но как физиолог дал весьма ценный совет: для имитации перегрузки в земных условиях использовать центрифугу. И между делом спросил, не слишком ли торопится Циолковский и, вообще, нужно ли *это*, ведь так много нерешенных проблем на нашей планете...

— Вот это успех! — поздравляли Чижевского на следующий день.

Никто не думал, что Павлов будет разговаривать на эту тему. Ведь Павлов — сухой человек. Иное дело — Бехтерев. Психиатр, невропатолог. Посмотрим, что он предложит Циолковскому. От Бехтерева можно ожидать самых необычайных поступков. Павлов — классик, Бехтерев — романтик, притом восторженный.

В кабинете, в котором Бехтерев принимал его, Чижевский оказался в окружении стеллажей со стеклянными банками, где находился человеческий мозг, помещенный в формалин. Преодолевая себя, он разглядывал надписи на банках, указывающие, кому принадлежит тот или иной мозг. Попадались известные фамилии.

Бехтерев, удовлетворенный произведенным впечатлением, произнес фразу,

которую, вероятно, говорил не один раз посетителям этого кабинета.

— *Вот, — сказал он, — в этом небольшом объеме розовато-серого вещества, состоящего на восемьдесят и даже более процентов из воды, заключена вся мудрость и все возможности человека.*

Бехтерев произвел на Чижевского впечатление человека эмоционального и более открытого, чем Павлов. Рядом с ним он не чувствовал скованности и без смущения рассказал о К.Э. Циолковском и тех вопросах, которые его беспокоят: как поведет себя человеческий организм в условиях невесомости.

— Вы коммунист? — неожиданно спросил Бехтерев гостя.

Чижевский ответил уклончиво. В партии не состоит, «но логика и история говорят о том, что эпоха капитализма заканчивает свое брэнное существование, ибо он уже стал немощным и брэнным. Следующая эпоха — социализм, при бурном, неслыханном развитии техники, которая подготавливается новой физикой, физикой атома». Именно так он сформулировал свои взгляды.

Этот эпизод, описанный Чижевским в книге «Вся жизнь», выглядит довольно странно и как будто даже искусственно. Нет сомнений в том, что Бехтерев без обиняков задал свой вопрос, слушая знакомые речи «о брэнном капитализме» из уст молодого человека. Бехтерев был лейб-медиком Николая Второго, имел генеральский чин в царской армии и понимал, что как специалисту ему нет равных в России независимо от того, как он относится к коммунистическим идеям. Вопрос в том, зачем Чижевский вынес этот текст на страницы своей книги? Полагал ли он, что это поможет книге пройти идеологические барьеры, а может быть, у него были какие-то другие резоны?

Вправе ли мы укорять в этом Чижевского, можем ли винить Коперника,

Галилея, признавших догматы Церкви под страхом быть преданными костру?

В недавно обнаруженных и расшифрованных записях в его секретных тетрадях можно прочитать, как он во время обыска спокойно наблюдал за следователем, который листал его дневники. Никакой крамолы там быть не может, успокаивал он себя. «Кто же будет писать хулу на власть в своих дневниках?» Верил ли он сам в то, о чем говорил Бехтереву? Вполне возможно, это был повод заявить официально о своей лояльности.

Последняя встреча с В.М. Бехтеревым произошла у него в Москве, в Политехническом музее. Бехтерев выступал в большой аудитории, и Чижевский тогда после лекции зашел в комнату, примыкающую к аудитории, навестить его. А через некоторое время из газет он узнает о смерти Бехтерева.

Такой внезапный уход из жизни знаменитого психиатра и невролога потряс не только Чижевского, но и многих в Москве, Ленинграде и других городах России. Официальной причиной смерти в газете «Известия» было названо «отравление несвежими бутербродами».

...История – это хаос. Войны, революции, проявления агрессии – все возникает спонтанно, непредсказуемо. Так было принято считать во все времена. А.Л. Чижевский был первым, кто, опираясь на большой массив исторических фактов, опроверг такую трактовку мировой истории, показал при этом, что у различных народов на разных континентах крупные события их общественной жизни протекают синхронно.

Синхронность – ключевое слово. Это означает, что выбросы энергии Солнца носят глобальный характер и, действуя одновременно на земной шар, в разных

В таблице приведены номера циклов солнечной активности в XX и XXI веках, даты их начала, даты максимумов и окончания циклов (по данным Института земного магнетизма и распространения радиоволн Российской академии наук)

Порядковый номер цикла	Начало цикла Год, месяц	Максимум Год, месяц	Окончание цикла Год, месяц
14	1902 III	1906 II	1913 VII
15	1913 VIII	1917 VIII	1923 VII
16	1923 VIII	1928 IV	1933 VIII
17	1933 IX	1937 IV	1944 I
18	1944 II	1947 V	1954 III
19	1954 IV	1958 III	1964 IX
20	1964 X	1968 XI	1976 VI
21	1976 VII	1979 XII	1986 VIII
22	1986 IX	1989 VII	1996 V
23	1996 VI	2000 IV	2008 XII
24	2009 I	2014 IV	2019 XII
25	2020	2025 (?)	???

странах возбуждают исторически сходные процессы. Каждый такой цикл в среднем составляет одиннадцать лет, т. е. на каждое столетие приходится девять циклов солнечной активности.

Это открытие, сделанное Чижевским, по его мнению, позволяет выявлять периоды максимальной концентрации исторических событий в прошлом и прогнозировать их в будущем.

Сегодня, уже в 20-е годы XXI столетия, ничто не мешает нам оценить хронику исторических событий прошедшего XX века и параллельно с еще большей точностью сопоставить их с процессами, происходившими на Солнце.

Итак, ушедшее столетие началось с быстрого роста в 1902 году числа пятен на диске Солнца и уже к 1905 году их количество достигло максимума. На этот год приходится Кровавое воскресенье – расстрел 9 января 1905 года в Санкт-Петербурге мирной демонстрации рабочих (130 убитых и 299 раненых по данным Департамента полиции).

12 августа 1906 года – покушение на премьер-министра России П.А. Столыпина, в результате которого погибло и умерло от ран 30 человек, сам Столыпин остался жив.

В 1907 году каждый день в среднем погибало до 18 человек, среди которых были чиновники, офицеры, духовенство.

В те годы по Петербургу ходит мрачный анекдот: в редакции журнала сотрудник спрашивает редактора: «Биография нового генерал-губернатора лежит в запасе уже третий день. Разобрать?» «Нет, – отвечает редактор. – Оставьте. Сразу пустим в некролог».

Действительно, газеты того времени писали о какой-то неимоверно тяжелой атмосфере ненависти и психоза, сложившейся в обществе, когда террор для многих стал средством самоутверждения.

Следующий цикл – 15-й – роковой для России и Европы. Начался в 1913 году и на первых порах не предвещал каких-либо катаклизмов. Но в 1914 году началась Первая мировая война, которая постепенно разгоралась, охватывая европейские страны. Кровавые события произошли и на территории Османской империи. Там в 1915 году физически были уничтожены около 1.5 миллиона армян. Эта трагедия стала незаживающей раной для армянского народа.

Наиболее гневливым Солнце оказалось в 1917 году. Обелиски с пугающе длинными списками убитых во время мировой войны и поныне можно увидеть во многих городах и поселках Европы.

В России – две революции в 1917 году. Первая мировая и последовавшая за ней Гражданская война унесли от голода и болезней, от красного и белого террора миллионы человеческих жизней. Более четверти своего национального богатства Россия потеряла.

К 1921 году воинственная риторика стихает. Солнечная активность идет на спад, в России начинается период восстановления экономики. Новая экономическая политика (НЭП) пытается вывести страну из кризиса.

1928 год. Очередной пик солнечной активности совпал с экономическим кризисом в СССР, вызванным политическими причинами. В этом же, двадцать восьмом году – начало великой депрессии в США, а годом позже – мировой экономический кризис.

Начало тридцатых – «вегетарианский» период по определению Анны Ахматовой. Особенно в сравнении с последующими 37–38 годами, когда физическое уничтожение неугодных было поставлено на конвейер.

В эту молотилку А.Л. Чижевский попал не сразу. Возможно, свою роль сыграла его номинация на Нобелевскую

премию. На упомянутом Первом Международном конгрессе 1939 года в Нью-Йорке А.Л. Чижевский был избран его Почетным президентом. От имени конгресса в Нобелевский комитет был направлен Меморандум о его научных трудах. Читая этот документ, испытываешь двойственное чувство: гордость за нашего соотечественника, достигшего таких вершин признания, и боль за те унижения и издевательства, которым он был подвергнут. Советские чиновники сделали все возможное, чтобы это достижение российской науки осталось неизвестным.

Меморандум конгресса содержит больше двадцати пунктов с подробным перечислением открытий и заслуг Александра Леонидовича Чижевского. Вот некоторые из них.

«...Установление мирового синхронизма в частоте смертности позволило проф. Чижевскому в 1938 году предположить новый вид биологически активных излучений при определенных электрических процессах на поверхности Солнца, максимально поднимающих кривую смертности... Эти работы проф. Чижевского были молниеносно подхвачены во многих странах. Проф. Т. Дюль и проф. Б. Дюль организовали даже специальный институт для их всестороннего изучения и достигли замечательных результатов.

В то же время проф. Чижевский предложил блестящий практический выход: он изобрел способ защиты больных от действия “М-лучей” – бронированные металлом палаты, ... куда должны переводиться больные указанных категорий при приближении данных феноменов, согласно специальным бюллетеням, выпускаемым... астрономическими обсерваториями (“служба Солнца”)...

...Тот факт, что жизнь биосферы Земли зависит от солярных явлений, давно стал трюизмом. Но впервые проф. Чижевский показал степень этой зави-

симости и ее интимную глубину. В этом заключается его громадная заслуга...

...Проф. Чижевский в 1928 году первым из ученых открыл биологическое и физиологическое действие пенетрантного (проникающего), или космического, излучения... Живые существа на поверхности Земли находятся под непрерывным воздействием этого вездесущего излучения.

Проф. Чижевский начал свою научную деятельность очень рано, со студенческой скамьи – с 1915 года. Сейчас ему 42 года от роду, и он вступает в самый плодотворный для ученого возраст. Поэтому мы вправе ждать от этого гениального натуралиста еще замечательных открытий.

Обширность и глубина трудов проф. Чижевского показывает, что свою жизнь с самых юных лет он посвятил зорким наблюдениям за явлениями природы и глубоким размышлениям о них, что всю жизнь, не щадя себя, он работал в лабораториях. Он – неутомимый, исключительный по выносливости и творческой энергии человек, истинный труженик на научной ниве, отдавший всего себя и все свое слабое от природы здоровье служению высшим гуманистическим идеалам человечества.

К настоящему времени число печатных трудов проф. Чижевского, вышедших на многих языках, достигает 400. Число печатных трудов его учеников и последователей во всем мире доходит до 2500... Эти цифры говорят о том огромном влиянии, которое оказали труды проф. Чижевского на развитие науки во всем мире.

Изучать его работы – истинное наслаждение для всякого ученого, врача, биолога и всякого натуралиста вообще, стоящего на уровне современной науки, ибо его труды и идеи идут в ее авангарде, опережают ее, и иногда значительно. Они блещут не только прогрессивной новизной, глубиной и дерзостью полета мысли, но и высоким мастерством изло-

жения или изяществом математического базиса.

И для полноты характеристики этого замечательного человека нам остается еще добавить, что он, как это видно из широко известных его биографий, написанных проф. Лессбергом, проф. Реньо, проф. Понтани и др., является также выдающимся художником и утонченным поэтом-философом, олицетворяя для нас, живущих в XX веке, монументальную личность да Винчи».

Перечисленное выше – только малая часть Меморандума о научных трудах А.Л. Чижевского.

«Ученые многих стран Америки, Европы и Азии, собравшиеся на Первый Международный конгресс по биологической физике и биологической космологии в Нью-Йорке в сентябре 1939 г., настоящим меморандумом отмечают и подчеркивают величайшее научное и практическое значение трудов своего Почетного Президента проф. Чижевского и его заслуги перед Человечеством.

Подписали меморандум: проф. д-р А. д'Арсонваль, Член института, проф. д-р П. Ланжевен, Член института, проф. д-р Л. Борайль, профессор Колумбийского Университета, д-р В. де Смитт, проф. д-р А. Эптон. Генеральный Секретарь Конгресса – д-р Дюпен».

Копия Меморандума хранится в библиотеке по естественным наукам Российской академии наук (РАН).

В поездке на конгресс Чижевскому было отказано. А от выдвижения на Нобелевскую премию он отказался сам, «по этическим мотивам», как ему пришлось написать. Что это были за «мотивы»? Не пояснялось.

Среди длинного перечня работ Чижевского, которые послужили поводом для выдвижения его на Нобелевскую премию, значится пункт под номером 2: «Открытия в области биофизики и электрофизиологии».

«...Проф. Чижевскому принадлежит честь открытия в 1919 году биологического и физиологического действия униполярных аэроионов – в последующие годы – всесторонняя разработка этого открытия применительно к медицине, ветеринарии, сельскому хозяйству... оказалось, что аэроионы отрицательной полярности сдвигают все функции в благоприятную сторону, а аэроионы положительной полярности часто влияют крайне неблагоприятно. Эти исследования позволили проф. Чижевскому глубоко проникнуть внутрь живой клетки и впервые показать, какое значение имеют положительные и отрицательные заряды в ее жизнедеятельности».

К этому времени имя ученого уже стало известным в России и прежде всего благодаря его изобретению, так называемой «люстры Чижевского». История открытия им влияния ионизированного воздуха на состояние человека и животных представляет не только научный интерес. В 1918 году в Калуге в домах было холодно и голодно. Тем не менее в обстановке мало благоприятствующей научным исследованиям Чижевский решил во чтобы то ни стало начать лабораторные опыты с атмосферным электричеством.

В большом кабинете в присутствии глядящих с портретов Нахимова (двоюродного деда Александра Чижевского) и других выдающихся родственников, прославившихся в походах Суворова и Кутузова, состоялся семейный совет. Собрались отец Чижевского Леонид Васильевич и Ольга Васильевна, его сестра, заменившая Чижевскому рано умершую мать. Шура объяснил близким, что речь идет об экспериментах, которые позволяют выяснить, в какой мере положительные и отрицательные аэроионы оказывают влияние на организм животных. Для этого придется приобрести лабораторных белых крыс, корм для

них. Потребуется ежедневно этот корм скрупулезно дозировать, готовить, регулярно взвешивать животных. Мало того, большую комнату в доме понадобится переделать под лабораторию, отапливать, поддерживать в ней зимой необходимую стабильную для опытов температуру. Корм, дрова, клетки для крыс – все это обойдется недешево, значит, придется продать часть собственных вещей... Как семья к этому отнесется?

Отец Чижевского сразу поддержал идею эксперимента, а Ольга Васильевна сказала, что без сожаления расстается с частью своего гардероба, а все свободное время отдаст уходу за животными, приготовлению и взвешиванию корма. «...Мы расцеловались», – пишет Чижевский в своих воспоминаниях. Немаловажным в их решении было одобрение этих экспериментов Циолковским, к которому в доме относились с большим пиететом.

К новому году все было готово. Клетки заполнили комнату, вскоре из железнодорожной больницы прибыли белые крысы, а Ольга Васильевна сшила себе из толстой свиной кожи перчатки с длинными крагами, чтобы защититься от укусов. Приборы для измерения положительных и отрицательных ионов в воздухе уже стояли наготове. Оставалось только обозначить контрольных животных несмываемыми синими метками. Второго января 1919 года опытная партия крыс в специальном изолированном от контрольной группы помещении начала вдыхать воздух с отрицательными аэроионами...

Уже первые результаты опытов показали, что «трио» находится на верном пути, а вскоре было точно установлено, что отрицательные ионы воздуха действуют на организм благотворно, тогда как положительные аэроионы чаще всего оказывают неблагоприят-

ное влияние на здоровье, рост, вес, поведение и внешний вид животных.

Год спустя Чижевский подготовил доклад о результатах экспериментов, разослал его ряду ученых, в том числе Сванте Аррениусу, нобелевскому лауреату по химии. А в мае 1920 года Аррениус написал ему: «Вам удалось открыть явление весьма большого научного значения и поставить ряд очень смелых, неожиданных проблем».

Именно Аррениус в 1920 году, впечатленный идеями и экспериментами Чижевского, официально пригласил молодого ученого из России поработать в его лаборатории в Швеции. Как раз в это время в Бергене должен был состояться Международный конгресс по геофизике, Советская Россия получила приглашение представить на этом конгрессе своих ученых.

Это был шанс и для Чижевского, и для мировой науки.

Все уже было готово к отъезду. Участникам конгресса были выданы костюмы, рубашки и туфли, а также продукты на дорогу. В мыслях Чижевский уже представлял себя в лаборатории Каролинского института в окружении необходимых приборов для получения ионов воздуха, в тепле, от которого давно уже отвык, – в Калуге дров и угля не доставало. Он даже намеревался совершить ряд путешествий по европейским странам и прежде всего по Италии.

Но за два дня до отъезда, на рассвете его разбудили... В глаза ударил яркий свет. Перед ним стоял посыльный в буденовке. Под окном тарахтел мотоцикл с коляской. На нем Чижевского и повезли в Народный комиссариат иностранных дел, где Чичерин, комиссар, по-нынешнему министр иностранных дел, отрываясь от бумаг, с которыми он работал при свечах, несмотря на светящееся небо, сообщил, что поездка делегации, увы, отменяется. Чрезвычайная комиссия сочла



Семья Чижевских в экспозиции музея А.Л. Чижевского в Калуге

ее нецелесообразной, а заграничные паспорта надлежит сдать. Была даже сказана загадочная фраза: якобы причиной такого неожиданного поворота событий оказался поэт Константин Бальмонт.

Позже все прояснилось. Бальмонт действительно придумал, как сбежать из Советской России, не дожидаясь попутного «философского парохода». За некоторое время до своей поездки на Запад он написал патетическую оду молодой Советской республике, которая произвела большое впечатление на Луначарского. Дальше – по сценарию. Бальмонт попросил отправить его в Европу, с тем чтобы своей поэмой просве-

тить русскую эмиграцию, дать ей возможность оценить масштаб происходящих в стране позитивных перемен.

В изложении Чижевского, Бальмонт с заграничным паспортом в кармане, с приличными командировочными, после шумного банкета отбыл из Москвы. Но едва поезд пересек границу, прямо на перроне вокзала Бальмонт рассказал встречавшим его представителям прессы все, что он думает о новой власти. Под впечатлением от его выступления Ленин, которому Чрезвычайная комиссия в подробностях сообщила о происшедшем скандале, наложил резолюцию – впредь таких ошибок не допускать. Судьба поездки в Шве-

цию на конференцию А.Л. Чижевского и его коллег была решена.

Осуждал ли А.Л. Чижевский Бальмонта на самом деле? Скорее всего, он искренне возмущался его лукавством. Но с годами внутренний цензор в нем все более пристально следил за тем, что выходит из-под его собственного пера. Интересна запись, сделанная им в тетрадах, по-видимому, уже в 60-е годы, недавно опубликованная Александром и Дмитрием Головановыми, биографами А.Л. Чижевского. ... Следователь во время обыска просматривает груды его рукописей и сугубо личные дневники, отбирая их для изучения. Рядом стоит молчаливый солдат, опираясь на винтовку. «Что может быть там криминального, думал я, – пишет Чижевский в своем неопубликованном при жизни дневнике. – Ведь нужно быть круглым идиотом, чтобы в наш век – век страха – писать что-либо несовместимое с общепринятым мнением. ...Об этом опасно было даже думать...»

По аналогии с золотым веком литературы пушкинской поры плеяда поэтов конца XIX – начала XX века с легкой руки Соловьева получила название Серебряного века русской поэзии. Юность А.Л. Чижевского, его становление как поэта пришлось как раз на то время, когда отголоски Серебряного века все еще звучали, еще живы были Александр Блок, Николай Гумилев и Гражданская война еще не разделила Россию на два непримиримых лагеря.

Трепещет полумрак.

Жемчужный свет небес.

Как паутина сон. Овраги и поляны

Еще наполнены виденьями чудес.

Деревья и кусты одушевленно-странны.

Как запоздала ночь! Не поймана едва:

Мистерия идет и совершает в дреме

Свои деяния. Проснулась лишь листва

И терпким трепетом тревожно будит время.

«...Никто из поэтов начала века не передает лучше вас тончайшие настроения, вызванные явлениями природы, – писал Чижевскому Алексей Толстой, – ваши стихи являются плодом большой души и большого художественного чутья...».

Поэтические опыты «юноши в студенческом сюртуке» были тепло оценены Иваном Бунинным и его братом Юлием, а также Бальмонтом и Брюсовым. В «Бродячей собаке», в «Стоиле Пегаса», в «Домино» – модных тогда клубах – он встречался с Анатолием Мариенгофом, Бурлюком, Борисом Пастернаком.

– Из вас вышел бы неплохой поэт, если бы вы меньше увлекались наукой, – сказал однажды полужутя Владимир Маяковский, прочитав сборник его стихов. – Поэзия и наука очень ревнивы: они не признают любовниц! И та, и другая – кровопийцы!

В определенном смысле Маяковский оказался прав. Судьбы поэтов в России, его собственная судьба подтверждают – поэзия отнимает жизни своих творцов. И чем незауряднее поэт, тем выше риск. Но и наука для Чижевского оказалась «кровопийцей» ничуть не меньшей.

Позже о себе Чижевский с горькой иронией писал:

В науке я прослыл поэтом

Среди поэтов – я ученый

Увы, не верю я при этом

Моей Фортуне золоченой

Мой путь поэта безызвестен,

Натуралиста путь тревожен,

А мне один покой лишь лестен,

Но он как раз и невозможен.

Чижевский был арестован 22 января 1942 года, уже находясь в эвакуации в Челябинске. Повод для ареста был абсурдным. По одной из версий, его попутчик, человек литературного круга,

в доносе якобы сообщал, что по дороге в Челябинск Чижевский ночью выходил на полустанках из вагона, чтобы подавать сигналы немецким бомбардировщикам руками в белых перчатках².

За этой «шуткой» последовало восемь лет лагерей в Свердловской области и в Казахстане, а после четыре года ссылки в Караганде.

При жизни о своем пребывании в лагерях и ссылке А.Л. Чижевским не было опубликовано ни строчки. Многие предполагали, что это было связано с тем, что он торопился в первую очередь издать результаты своих научных исследований, завершить воспоминания о Циолковском. О его собственных страданиях можно было лишь догадаться, читая некоторые стихотворения, написанные им в лагере.

Но случилось неожиданное! Несколько лет назад биографы А.Л. Чижевского А. и Д. Головановы обнаружили в его архивах тетради с зашифрованными записями, сделанными после возвращения из ГУЛАГа. В них – о тюрьмах и лагерях, о том, через что пришлось пройти ученому.

Еще не все записи расшифрованы и не все опубликовано. Но то, что уже вышло из печати, заставляет содрогнуться. «...Я заметил, лучше всего у него работали именно руки. Они были обязательным органом обыска. Чего он не проверял глазами, он проверял пальцами, как слепой. Его интересовали больше всего швы. Они были для него самым подозрительным местом – в швы зашивались бриллианты и золотые монеты, на которые в первую очередь охотились обыскивающие воры. Все молчали, шуршали бумаги и вещи. Я с гадливостью смотрел на процесс обыска...»

Постепенно в ходе обыска выяснилось – ищут его дневники.

– *Но ведь я мог их и не писать?* – сказал Чижевский.

– *Могли, но писали,* – ответил следователь.

Это были личные дневники. Стало быть, сделал для себя вывод Чижевский, кто-то сообщил «куда следует» о том, что он их вел. Но кто бы это мог быть? И он вспомнил, как по пути в Челябинск попросил у попутчика авторучку. Лев Вениаминович Никулин, так звали его соседа по купе, поинтересовался, что он пишет. На это Чижевский простодушно ответил, что пишет личный дневник. Уже исписал шесть толстых тетрадей.

– Мы, писатели, придаем значение личным запискам, – одобрил попутчик, а Чижевский еще удивился, чему он так радуется.

Теперь, во время обыска, он все это вспомнил. А поскольку в дневниках никакой крамолы, как ему казалось, не было, Чижевский успокоился, полагая, что недоразумение быстро выяснится и в ближайшее время он вернется к семье.

Но все оказалось не так, как он предполагал. Допросы, всего их было 38, происходили в разное время, чаще ночью, и продолжались часами. Пригодилась привычка ученого-исследователя. Множество мелких деталей, обрывки небрежно брошенных фраз складывались в цельное представление о людях и учреждении, в котором он оказался.

Его судила «тройка». Из его дневников был извлечен эпизод, в котором Чижевский с осуждением высказывался по поводу изнасилования женщины красноармейцами в Петрограде. На этом основании было составлено обвинительное заключение якобы об оскорблении, нанесенным им всей Красной армии. Попутно выяснилось

² Гений за колючей проволокой. Воспоминания о лагерном периоде жизни. М.: Гелиос, 2019. 500 с.

(публикация биолога Завадовского в газете «Правда»), что Чижевский на протяжении многих лет высказывается против идей Маркса, противопоставляя рабочему движению идеалистические представления о ведущей роли солнечной активности. Припомнили ему и дворянское происхождение, и письма на имя Сталина и Молотова по поводу необходимости внедрения аэроионификации в сельском хозяйстве.

Многочисленные встречи со следователем позволили, как ему казалось, разобраться в характере своего мучителя. Беспощадный к арестованным, жадный до денег (ночные допросы были его сверхурочным заработком), Водоватов в то же время не был криклив и грубостей себе не позволял. Впрочем, Чижевский полагал, что это скорее реакция на его собственное спокойно-взвешенное поведение.

Не обошлось без сюрпризов. Во время одного из последних допросов Водоватов, наклонясь к нему, шепотом сказал, что в Москве есть недоброжелатели, которые его, человека науки, пытаются очернить, представить антисоветским агитатором. Но лично он, вопреки подметным письмам, которыми наполнено его дело, считает его выдающимся ученым. Чижевский слушал, не зная, как на это реагировать – может, таким образом следователь пытается расположить его к себе, чтобы выудить какие-то компрометирующие обстоятельства.

Поздним вечером его вызвали на очередной, 39-й по счету, допрос. Когда конвоир открыл дверь в кабинет следователя, Чижевский не поверил своим глазам. Столы были сдвинуты. На них стояли бутылки, тарелки с закуской. Он вошел под одобрителный гул. Водоватов, взяв его под руку, несколько заплетаясь языком представил компании офицеров НКВД. От водки Чижевский отказался, опасаясь, что

для него, изнуренного голодом, это будет слишком серьезным испытанием. Ему придвинули красную икру, тарелку с семгой, белый хлеб, сливочное масло... Оказалось, поводом для ночного банкета были проводы на фронт двух подчиненных Водоватова.

Он разглядывал лица этих людей, вероятно, рассчитывавших провести годы страшной войны в глубоком тылу, в тишине тюремного заведения. Его тяготил их неуместно-радушный прием. Ведь именно они подвели его и таких же безвинных, как он, не к освобождению, а к тюрьме и лагерям. Не могли они не понимать цену состряпанных ими дел... Принесли патефон с пластинками, и Чижевский вдруг услышал сопрано Галли-Курчи. Странно звучал в этих стенах ее волшебный голос, исполняющий «Песню Сольвейг» Грига, но в этой ирреальности, преодолевая подступивший к горлу комок, он отчетливо видел составленные столы, офицеров с раздутыми на бедрах синими галифе, казенный портрет Сталина.

Невероятные события на этом не закончились. Водоватов подвел к нему молодого, недавно прибывшего следователя, как оказалось – по профессии математика и синоптика, попавшего в НКВД при каких-то непроясненных обстоятельствах. Он был молод, светло-рус, как младший старшему по званию доложил Чижевскому, что как специалист в этой области понимает ценность и значимость его работ. Он сказал также, что разговаривал о его деле с Водоватовым, но тот изменить ничего не может, так как клевета, идущая из Москвы, не позволяет ему, как он выразился, «дать делу хороший оборот».

Этот фантазмагорический вечер завершился в пять утра. Офицеры начали расходиться. Водоватов проводил его до камеры и напоследок вручил пакет со съестным и папиросами. Было это летом 1942 года.



Портрет А.Л. Чижевского на стене здания в Калуге

Сохранился портрет А.Л. Чижевского той поры, сделанный цветными карандашами художником А.В. Григорьевым, который вместе с ним находился в Карагандинском лагере. Высокий лоб, открытое лицо. Борода вольно струится от подбородка. Волосы темно-русые, шелковисты. На фото того же времени взгляд – сосредоточенный, на карандашном портрете – скорее растерянный и недоверчивый.

После возвращения из Караганды А.Л. Чижевский прожил еще шесть лет. Он написал замечательные воспоминания о своей юности, о гениальном старшем друге – К.Э. Циолковском. Торопился дописать научные книги, донести читателям и потомкам результаты своих исследований. Уже в самые последние годы его жизни подтвердились его предположения о переме-

щении заряженных частиц от Солнца в космическое пространство, в том числе и к Земле. Появились неопровержимые доказательства, полученные с помощью спутника «Луна-1» группой ученых под руководством Константина Грингауза (Институт космических исследований, РАН), а спустя три года эти результаты были подтверждены с помощью американского спутника «Маринер-2», отправленного к Венере. С этого времени в мировой науке была открыта новая страница в изучении солнечного ветра. Его скорость – 300 километров в секунду. Вдумайтесь! Если когда-нибудь удастся оседлать этот поток или создать средство перемещения с подобной скоростью, путешествие из Петербурга в Москву займет одну-две секунды. Во время магнитной бури скорость солнечного ветра возрастает

до 600–700 километров в секунду. А еще ветер из Галактики, космические лучи...

Да, верно, еще в середине девятнадцатого столетия английский астроном Ричард Кэррингтон обратил внимание на то, что хвосты пролетающих по небу комет направлены в сторону, противоположную Солнцу. Как будто Светило, набрав воздух, дует в космическое пространство, отгоняя от себя назойливых соглядатаев. Кэррингтон обнаружил связь между вспышками на Солнце и магнитными бурями на Земле. Но именно А.Л. Чижевский первым раскрыл нам зримые и понятные принципы предвидения социальных потрясений, выявил взаимосвязь между человеческим мозгом и периодически всплесками солнечной активности. Сегодня это влияние доказано физиологическими исследованиями ученых разных стран. А его исследования крови, движущейся в сосудах, и агрегация эритроцитов (их склеивание), которые он увидел в микроскопе, находясь в Карлаге в ссылке, сегодня обрели еще большую актуальность, поскольку операции на сосудах сердца при инфаркте миокарда и стенокардии могут оказаться бесполезными, если не контролировать способность эритроцитов склеиваться и образовывать тромбы.

Не все написанное им опубликовано. С его тетрадями и дневниковыми записями нам, возможно, еще предстоит познакомиться. Но его научная, философская, литературная и художественная деятельность дают повод пересмотреть бытующее мнение о том, что истинно универсальные умы возможны



Медаль Чижевского

были только в прошлые столетия. Главное дело своей жизни он – «Леонардо да Винчи XX века» – как о нем было сказано при номинации на Нобелевскую премию, все-таки сумел выполнить.

Его последнее стихотворение написано в 1964 году незадолго до смерти. Земля примет его, «чтоб снова в зеленоющем стебле исторгнуть к Солнцу дух и тело», пишет А.Л. Чижевский. А в последних строчках, по сути, духовное завещание своим друзьям и последователям:

.....
Благословим же дальнюю звезду
И горсть своей земли печальной!
Друзья мои, я вечно к вам иду,
Как к истине первоначальной.

Список основных трудов А.Л. Чижевского

1. Чижевский А.Л. Физические факторы исторического процесса. Калуга, 1924. 72 с.
2. Чижевский А.Л. Фактор, способствующий возникновению и распространению массовых психозов / под. ред. Ф. Крауз, Н.А. Семашко.

- Русско-немецкий Медицинский журнал. 1928. № 3. С. 101–131.
3. Чижевский А.Л. Модификация нервной возбудимости под влиянием пертурбаций во внешней физико-химической среде. Опыт изуче-

- ния коллективной психоневрологии / под ред. Ф. Крауз, Н.А. Семашко. Русско-немецкий Медицинский Журнал. 1928. № 9. С. 501–518.
4. Чижевский А.Л. Устройство для ионизации газов и жидкостей. Л.: Вестник Комитета по Изобретательству, 1931. № 12. С. 62, 95. Излагается содержание авторского свидетельства на изобретение электроэффлювиальной установки для ионизации воздуха, газов и жидкостей (№ 24387, ил. 12. г 1).
 5. Чижевский А.Л. О патологических явлениях, возникающих под влиянием вдыхания дезионизированного воздуха // Acta Medica Scandinavica. Stockholm, 1941. v. 106, Fasc. 5–67. P. 516.
 6. Чижевский А.Л. Атмосферное электричество и жизнь // Сб. «Земля во Вселенной». М.: Мысль, 1964. С. 422–442.
 7. Чижевский А.Л. Об одном виде специфически-биоактивного или Z-излучения Солнца / Сб. «Земля во вселенной». М.: Мысль, 1964. С. 342–372.
 8. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 367 с.
 9. Чижевский А.Л. Структурные образования из эритроцитов в движущейся по сосудам крови // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины, 1951. № 12. С. 443.
 10. Чижевский А.Л. Структурный анализ движущейся по сосудам крови // Вестник Академии наук Каз. ССР. 1951. № 12 (81). С. 58.
 11. Чижевский А.Л. Аэроионификация зданий // Вестник Академии наук Каз. ССР. 1953. Т. 10, № 9(102). С. 31–44.
 12. Чижевский А.Л. Ориентация и кинематика эритроцитов в кровотоке // Известия Академии наук СССР. Серия биологическая. 1953. № 5. С. 72.
 13. Чижевский А.Л. Электрореакция оседания красных кровяных телец (ранняя диагностика рака) // Клиническая медицина. 1953. № 3. С. 60.
 14. Чижевский А.Л. Космический пульс жизни: Земля в объятиях Солнца, М.: Мысль, 1995. 767 с.
 15. Чижевский А.Л. Аэроионы и жизнь. Беседы с Циолковским, М.: Мысль, 1999. 716 с.
 16. Чижевский А.Л. Гений за колючей проволокой // Т. 1. Структурный анализ движущейся крови. М.: Гелиос, 2019. 500 с.
 17. Чижевский А.Л. Гений за колючей проволокой // Т. 2. Биофизические механизмы реакции оседания эритроцитов. Электрические и магнитные свойства эритроцитов. Воспоминания о лагерном периоде жизни. М.: Гелиос, 2019. 500 с.

Список основных трудов А.Л. Чижевского на иностранных языках

1. Chizhevsky A.L. Über die Wechselbeziehungen zwischen der periodischen Tätigkeit der Sonne und den Cholera und Grippe Epidemien // Deutsch-Russische Medizinische Zeitschrift / Schriftleitung: Geh. Rat. Prof. D-r med. F. Kraus (Berlin) und Prof. D-r med. N. Semaschko (Moskau). Vol. III, № 9, 1927. P. 511–539.
2. Chizhevsky A.L. Über die Veränderung der Nervenregbarkeit unter dem Einfluss der Perturbationen in der äusseren chemisch-physikalischen Umwelt. Versuch zum Studium der Kollektiv-Psychoneurologie // Deutsch-Russische Medizinische Zeitschrift / Schriftleitung: Geh. Rat. Prof. D-r med. F. Kraus (Berlin) und Prof. D-r med. N. Semaschko (Moskau). № 8, 1928. P. 479–500.
3. Chizhevsky A.L. L'Aéroionotherapie des maladies pulmonaires. Recherches expérimentales de l'effet de l'air ionisé sur la tuberculose des poumons, la pneumonie et la bronchite // La Presse thermale et climatique. Journal d'Hydrologie et de climatologie médicales. Paris. 1929. Vol. 70, № 3159. P. 652–666.
4. Chizhevsky A.L. Action de l'ionisation de l'atmosphère et de l'ionisation artificielle sur les organismes sains et les organismes malades // Traité de climatologie biologique et médicale, 1934. Vol. 1. P. 661–678.
5. Chizhevsky A.L. Nouvelles méthodes de produire des aérosols, fortement ionisés, de solutions pharmacologiquement actives et de la vapeur d'eau dans des buts d'inhalation // Annales de Médecine Physique et de Physio-Biologie, Anvers: 1935. Vol. 28, Fasc. 3. P. 49–69.
6. Chizhevsky A.L. Summaries of Scientific Papers to be read at the Sixth. International Congress of Physical Medicine, London. 1935, May // Acta Medica Scandinavica, Stockholm: 1937. Vol. 91, Fasc. 4–5. P. 357–370.
7. Chizhevsky A.L. L'aéroionisation comme facteur physiologique, prophylactique et thérapeutique et comme un nouvel élément sanitaire hygienique de l'air conditionné // Acta Medica Scandinavica. Supplementum 87. Monographic. Stockholm: 1938. P. 1–100.
8. Chizhevsky A.L. Traitement des hypertension sanguines de différente origine à l'aéroionisation de polarité négative // Acta Medica Scandinavica. Stockholm: 1939. Vol. 99, Fasc. 2–3. P. 117–119.

EARTH & UNIVERSE

1 (343), 2022

January–February

TABLE OF CONTENT:

Lev M. ZELENYI Editorial	3
Valeriy M. NAKARYAKOV, Ivan V. ZIMOVETS, Sergey A. ANFINOGENTOV Plasma Symphony, or MHD Waves In the Solar Corona	5
Olga V. KHABAROVA What For Does the Sun Need Magnetic Tornadoes?	22
Roman A. KISLOV Solar Wind And Current Sheets: Classical Ideas And New Discoveries	36
Nikolay T. TARASOV Solar Activity, Space Weather, and Earthquakes	52
XXI Century Cosmonautics	
Boris M. SHUSTOV Space-Borne or Earth-Bound?	63
Observatories, Institutes	
Olga V. KIYAEVA, Igor S. IZMAILOV, Tatyana V. SOBOLEVA, Natalia A. SHAKHT Pulkovo Observatory: Around The Refractor	74
People of Science	
Yuri I. GURFINKEL Forever I Come to You... To the 125th Anniversary of Alexander Chizhevsky	89
Table of Content and Selected Abstracts	109

Cover: Parker Solar Probe (NASA) crossing the boundary between solar wind and solar corona at approximately 18.8 solar radii in 2021. Image courtesy: NASA's Goddard Space Flight Center/Joy Ng

EARTH & UNIVERSE

1 (343), 2022

January–February

Plasma Symphony, or MHD Waves In the Solar Corona

Valeriy M. NAKARYAKOV^{1,2}, Ivan V. ZIMOVETS³, Sergey A. ANFINOGENTOV⁴

¹ Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences

² University of Warwick, Great Britain

³ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences

⁴ Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394822010017

Solar corona has been one of the most mysterious regions of the Solar system. Two things cause the main interest to that part of solar atmosphere. The first one is that it is the region, where the most energetic events in the Solar system occur, including solar flares and mass ejections. Second, solar corona is a natural laboratory, where we can study various plasma processes. High-precision instruments, which are used to register solar radio emissions and UV and X-ray radiation, invisible to the naked eye, reveal diverse wave phenomena – stationary or running disturbances in plasma and magnetic field, which permeates the corona. As a rule their wavelength exceeds 1000 kilometers and their periods are greater than 1 second. The waves observed belong to several different types predicted by magneto hydrodynamics (MHD). One can imagine the set of those waves as a peculiar ‘music’, played by solar corona. Having ‘listened’ to it and analyzed it, one can get important and often unique data about physical properties of solar plasma and the processes in it.

What For Does the Sun Need Magnetic Tornadoes?

Olga V. KHABAROVA

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394822010029

Magnetic tornadoes are objects in plasma, which resemble tornadoes in the Earth’s atmosphere, but are observed on the Sun. These structures were discovered almost a century ago, but became a subject for discussions in a last decade only. Improved instruments gave opportunity to observe the details, which are essential to understand the nature of magnetic tornadoes. We discuss the appearance and the behaviour of these objects and the way they are studied.

Solar Wind And Current Sheets: Classical Ideas And New Discoveries

Roman A. KISLOV

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394822010030

The concepts of current sheets and solar wind developed simultaneously. The basics were laid by Soviet and American scientists in 1950s and 1960s. In half a century our knowledge about heliosphere, current sheets, and plasma deepened, but the main characteristics of the observed phenomena were so successfully described in the works of the founders, that even today any deviation from the old models is considered as non-trivial by the scientific community, in spite of contradictions and new results, which are described in the paper.

Solar Activity, Space Weather, and Earthquakes

Nikolay T. TARASOV

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394822010042

As long ago as 1853 Rudolf Wolf, a world-known astronomer suggested that enhanced solar activity might have an impact upon Earth seismicity. Wider studies of the effects, which the processes on the Sun and in the near-Earth space have upon the terrestrial crust and seismicity, began about 50–60 years ago. It was then, when the development of instruments made it possible to obtain a great volume of data that is essential for such a research. In last years many studies appeared, both in Russia (the USSR) and other countries.

This surge of interest may be explained by the fact that the new results may help us to make better forecast of rising seismicity, to study the impact of various factors upon it, to understand solar-terrestrial relations better. But the published results are often discrepant.

The problem of the initial cause and physical mechanism, underlying the influence of solar activity on the Earth's seismicity, is still a matter for discussion. Here we present some new results obtained during the studies of the effect of magnetic storms and other factors, connected with enhanced solar activity, upon Earth's seismicity.

Индекс 38808

Земля и Вселенная, 1/2022

Заведующая редакцией А.Ю. Обод

Редакторы С.А. Герасютин, Д.А. Кононов, О.С. Сажина

Корректор С.О. Розанова

Верстка макета Н.В. Мелкова

Просим обращаться

по вопросам публикации материалов:

(495)276-77-35 (доб. 42-31), e-mail: zevs@naukaran.com

по вопросам сотрудничества:

(495)276-77-35 (доб. 43-01 или 43-02),

e-mail: journals@naukaran.com

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом

Совета министров СССР по печати 28 июня 1991 г.

Свидетельство о регистрации № 2119

www.naukabooks.ru/zhurnali/katalog/zemlja-i-vselennaja/

Все права защищены.

Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Все иллюстрации в статьях предоставлены авторами.

*Ответственность за точность и содержание рекламных
материалов несут рекламодатели*

12+

Сдано в набор 27.12.2021 г. Подписано к печати 27.01.2022 г.

Дата выхода в свет 14.02.2022 г. Формат 70 × 100¹/₁₆

Цифровая печать Усл.печ.л. 9.75 Уч.-изд.л. 9.75 Бум.л. 3.75

Тираж 1000 экз. Заказ № 1 Цена свободная

Учредители: РАН, ФГУП «Издательство «Наука»

Редакция и издатель: ФГУП «Издательство «Наука»

Адрес: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 90

Отпечатано в типографии ФГУП «Издательство «Наука»

Адрес: 121099 Москва, Шубинский пер., 6

АкадемКнига

Букинистический отдел осуществляет покупку и продажу научной литературы, книг по искусству, антикварных изданий, старинных открыток, гравюр и фотографий

Для оценки крупных библиотек выезжаем на дом

Принимаем заказы

Формируем библиотеки

Адрес: 101000, Москва, Б. Спасоглинишевский пер., 8, стр. 4

E-mail: bukinist@naukaran.com

Справки по телефону:

8 (495) 624-7219





НОВИНКИ И АКЦИИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ



[instagram.com/naukapublishers](https://www.instagram.com/naukapublishers)



[facebook.com/naukapublishers](https://www.facebook.com/naukapublishers)



vk.com/naukapublishers



Типографии ФГУП "Издательство "Наука"
www.tnauka.ru

- переплетные работы
- тиснение фольгой
- цифровая печать
- офсетная печать
- ламинирование
- цветоделение
- сканирование
- брошюровка
- лакирование
- цветопроба
- нумерация
- высечка
- верстка
- СТР

- ▶ Разумная ценовая политика
- ▶ Высокое качество продукции
- ▶ Реальные сроки выполнения заказов
- ▶ Работа высококлассных профессионалов



- ♦ Удобное месторасположение
- ♦ Тиражи от 20 экземпляров

- афиши
- календари
- удостоверения
- адресные папки
- визитные карточки
- фирменные бланки
- брошюры, журналы
- эксклюзивные издания
- полноцветные плакаты
- художественные альбомы
- книги в твердом переплете
- листовки, рекламные буклеты
- наклейки на бумажных материалах

Москва

Санкт-Петербург

Новосибирск

